

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO PARA PRUEBAS DE OXIDACIÓN  
CÍCLICA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ARNOLD FRANCISCO BASTIDAS MELO**

**LUIS MIGUEL ARROYAVE ESPINOSA**

**Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**JOSE LUDDEY MARULANDA ARÉVALO**

**Ingeniero Metalúrgico Ph.D**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PEREIRA, RISARALDA. JUNIO 17 DE 2016**

**Nota de Aceptación**

-----  
-----  
-----  
-----

-----

**Presidente del Jurado**

-----

**Jurado**

**Pereira, Risaralda. Junio 17 de 2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A JOSE LUDDEY MARULANDA ARÉVALO Ing. Metalúrgico. Ph.D en corrosión en alta temperatura, por su paciencia y orientación durante el trabajo de grado.**

**Al Ing. Mecánico Diego Pérez investigador por su colaboración y asesoría durante todo el desarrollo del proyecto de grado.**

**Al Ing. Ricardo Acosta por su ayuda desinteresada por sus recomendaciones, aportes, sugerencias, los prototipos y demás.**

**A la Universidad Tecnológica de Pereira, por financiar el desarrollo del proyecto, además de formarnos como personas integrales y prepararnos para la vida.**

**A la Tecno-Academia del SENA, por facilitar los instrumentos y equipos para los análisis de microscopía electrónica de barrido SEM.**

**Al grupo de investigación en materiales avanzados GIMAV y al laboratorio CECEND, por facilitar las instalaciones y equipos del laboratorio de metalografía donde se llevó a cabo el desarrollo de la prueba.**

**A nuestras familias por darnos la oportunidad de pertenecer a esta gran Universidad, contribuyendo al mejoramiento continuo de nuestras vidas.**

**A DIOS quien hizo posible este gran logro**

**A mi madre Isabel Bastidas por su amor, apoyo, confianza y gran ejemplo de vida**

**A mis hermanos Harold bastidas y José Miguel Bastidas por su apoyo y confianza**

**A mi familia por su gran comprensión y ayuda durante toda la carrera**

**A mis amigos que me acogieron como una gran familia**

**ARNOLD FRANCISCO BASTIDAS MELO**

**Agradezco a DIOS por bendecirme a lo largo de mi vida**

**A mi padre Misael Arroyave y a mi madre Myriam Espinosa, por la paciencia a lo largo de mi carrera y haberme regalado el gran tesoro de la educación**

**A mi hijo Juan miguel Arroyave y a mi compañera Pilar castro por darme la motivación y el apoyo a culminar mis estudios y ser un ejemplo para ellos**

**A mis amigos y compañeros de estudio, por ser unas excelentes personas y por todos los momentos vividos a lo largo de estos años**

**LUIS MIGUEL ARROYAVE ESPINOSA**

## **CONTENIDO**

<b>INTRODUCCIÓN</b>	10
<b>1. TITULO</b>	13
<b>2. OBJETIVOS</b>	13
2.1.OBJETIVO GENERAL	13
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
<b>3. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS</b>	14
3.1. DISEÑO	14
3.1.1. Pasos para realizar un diseño en ingeniería mecánica	14
3.1.2. Fases del diseño	14
3.1.3. Consideraciones de diseño mecanismo para pruebas de oxidación cíclica	15
3.1.4. Descripción y características de la estructura	16
3.1.5. Control de las variables en el sistema	18
3.1.6. Método de automatización	18
3.1.7. Cálculos necesarios para la selección del cilindro y el compresor	19
3.2.CONSTRUCCIÓN	20
3.2.1. Canastilla	20
3.2.2. Selección de materiales	21
3.2.2.1.Cilindro neumático	21
3.2.2.2. Compresor	21
3.2.2.3. Válvula solenoide 5x2	22
3.2.2.4. Cofre	23
3.2.2.5. Riel omega	24
3.2.2.6.Unidad de mantenimiento	24
3.2.2.7. Relevador y base	25
3.2.2.8. Temporizador asimétrico	26
3.2.2.9.Contador	26
3.2.2.10. Fuente de alimentación	27
3.2.2.11. Breaker	28

3.2.2.12.	Borneras	28
3.2.2.13.	Encauchetado tripolar	29
3.2.2.14.	Clavija hembra y clavija macho	29
3.2.2.15.	Pulsador de contacto normalmente abierto	30
3.2.2.16.	Selector de dos posiciones	30
3.2.2.17.	Racores y silenciadores	31
3.2.2.18.	Manguera de automatización	31
3.2.2.19.	Paro de emergencia	32
3.2.2.20.	Válvula reguladora	32
3.2.3.	Horno eléctrico marca Terrígeno	33
3.2.4.	ensamble del mecanismo	33
3.2.4.1.	Sistema eléctrico	33
3.2.4.2.	Sistema neumático	35
3.2.4.3.	Sistema mecánico	36
3.2.5.	Terminados y acabados	38
3.3.	PRUEBA DEL MECANISMO	38
3.3.1.	Oxidación cíclica a altas temperaturas	38
3.3.2.	Corrosión en sistemas expuestos a temperaturas elevadas	39
3.3.3.	Acero ASTM A53 GRADO B	40
3.3.4.	Prueba de oxidación cíclica	41
3.3.5.	Microscopía electrónica de barrido	42
4.	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	43
4.1.	RESULTADO FINAL DEL ENSAMBLE	43
4.2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA DE OXIDACIÓN CÍCLICA	44
4.3.	ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO SEM	47
4.3.1.	Análisis de microscopia electrónica de barrido SEM a la probeta 15	47
4.3.2.	Análisis de microscopia electrónica de barrido SEM a la probeta 13	51
4.3.3.	Análisis de microscopia electrónica de barrido SEM a la probeta 11	55
4.3.4.	Análisis de microscopia electrónica de barrido SEM a la probeta 9	58
4.4.	RESULTADOS GENERALES	61

<b>5. CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>62</b>
5.1.CONCLUSIONES	62
5.2. RECOMENDACIONES	62
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>64</b>
<b>7. ANEXOS</b>	<b>66</b>



## **LISTA DE FIGURAS**

- Figura 1. Horno eléctrico que se adecua, para la prueba de oxidación cíclica
- Figura 2. Base para el mecanismo de oxidación cíclica
- Figura 3. Diseño de la canastilla
- Figura 4. Cilindro neumático
- Figura 5. Compresor CRAFTSMAN
- Figura 6. Válvula 5x2 con solenoide
- Figura 7. Cofre metálico que alberga el sistema eléctrico y de control
- Figura 8. Riel omega
- Figura 9. Unidad de mantenimiento
- Figura 10. Relevador y base
- Figura 11. Temporizador asimétrico
- Figura 12. Contador
- Figura 13. Fuente de 24 V
- Figura 14. Breaker
- Figura 15. Borneras
- Figura 16. Encauchetado tripolar
- Figura 17. Clavijas hembra y macho
- Figura 18. Pulsador de contacto NA
- Figura 19. Selector de dos posiciones
- Figura 20. Accesorios de conexión del sistema neumático
- Figura 21. Manguera de automatización
- Figura 22. Paro de emergencia
- Figura 23. Válvula reguladora
- Figura 24. Plano del circuito eléctrico
- Figura 25. Plano del sistema neumático
- Figura 26. Diseño del sistema de soporte
- Figura 27. Principio de funcionamiento del SEM
- Figura 28. Comparativo entre el diseño inicial y el mecanismo finalmente construido

Figura 29. Comportamiento en la prueba de oxidación cíclica de la probeta 1

Figura 30. Comportamiento de la probeta 15 de acero ASTM A53 GRADO B con una temperatura de 600°C con un tiempo de exposición de 5 horas

Figura 31. Probeta 15 tiempos de exposición 5 horas a una temperatura de 600 ° C

Figura 32. Punto de análisis 1 en la probeta 15

Figura 33. Punto de análisis 2 en la probeta 15

Figura 34. Punto de análisis 6 en la probeta 15

Figura 35. Punto de análisis 8 en la probeta 15

Figura 36. Probeta 13 tiempos de exposición 10 horas a una temperatura de 600° C

Figura 37. Punto de análisis 1 en la probeta 13

Figura 38. Punto de análisis 3 en la probeta 13

Figura 39. Punto de análisis 6 en la probeta 13

Figura 40. Punto de análisis 9 en la probeta 13

Figura 41. Punto de análisis 10 en la probeta 13

Figura 42. Probeta 11 tiempos de exposición 25 horas a una temperatura de 600 ° C

Figura 43. Punto de análisis 1 en la probeta 11

Figura 44. Punto de análisis 2 en la probeta 11

Figura 45. Punto de análisis 3 en la probeta 11

Figura 46. Punto de análisis 5 en la probeta 11

Figura 47. Probeta 9 tiempos de exposición 50 horas a una temperatura de 600° C

Figura 48. Punto de análisis 1 en la probeta 9

Figura 49. Punto de análisis 4 en la probeta 9

Figura 50. Punto de análisis 6 en la probeta 9

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Composición química principal de los aceros ASTM A53

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A53

Tabla 3. Ruta de trabajo y registro del peso de las probetas

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1. MANUAL DE USO MECANISMO PARA PRUEBAS DE OXIDACIÓN CÍCLICA

## **RESUMEN**

En este trabajo se describen de forma detallada los pasos llevados a cabo para el modelamiento y construcción de un mecanismo que permitiera realizar pruebas de oxidación cíclica en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. En primer lugar, fue necesario conocer el sitio donde estaría ubicado el prototipo y así tener presente el espacio disponible para su operación. De igual forma, se realiza una investigación bibliográfica, en la cual se documenta acerca del proceso de oxidación cíclica a altas temperaturas. A raíz de esto, se denota la ausencia de un elemento con las características óptimas que llevara a cabo la prueba; únicamente se contaba con un horno en el laboratorio que serviría como punto de partida para cumplir el objetivo planeado, pero que debía ser modificado para un uso automático del mismo. Por consiguiente, se identifican los componentes básicos necesarios y adecuados para la construcción del dispositivo. El diseño del sistema fue modelado en la herramienta computacional SOLIDWORKS, con la cual se buscaba visualizar tridimensionalmente el horno mencionado y los componentes requeridos para la construcción, además de la forma correcta de ensamblarlos, todo esto basado en ideas surgidas de la observación y el análisis para obtener las diversas instalaciones y adecuaciones necesarias. Además se integran otros componentes en el modelo computacional como lo son el equilibrio entre costo y precisión, creando un diseño eficiente.

Este proyecto llevó consigo el desarrollo de múltiples tareas para pasar de ser un diseño plasmado en un papel y ser un modelo virtual, para convertirse en una realidad mostrada en su construcción. En la cual, la selección de los materiales ideales para esta, jugó un papel crucial. Posteriormente y guiados por el diseño elegido, se procede a ensamblar los elementos que permitieron hacer el montaje, el cual se componía del maquinado, ensamble y pintura de los elementos adquiridos. Finalmente, se realiza un manual de funcionamiento pensado y estructurado para que el usuario tenga fácil acceso al uso del mecanismo y le sea más sencillo poner en marcha el dispositivo, al programar éste con el panel de control dependiendo del protocolo de prueba que se planea utilizar en el ensayo, esto último, permitió realizar una prueba experimental de oxidación cíclica.

## INTRODUCCIÓN

A través de los años de evolución del ser humano, se han requerido herramientas y máquinas que mejoren la vida cotidiana en las poblaciones y asentamientos creados para vivir. Lo anterior, dio como resultado a lo largo de la historia la experimentación empírica con diferentes materiales y el desarrollo de dispositivos rudimentarios. Cada uno de estos fue en su momento lo más moderno para la ubicación temporal de cada uno, los cuales fueron usados para facilitar las actividades comunes de las sociedades de la época y seleccionando de este modo los de mayor utilidad y desechando así los que poco a poco se volvían obsoletos. (1)

Debido a la necesidad de mejorar las máquinas ya creadas y de innovar, se prestó mayor atención a los materiales utilizados en la maquinaria y al diseño de los equipos construidos, originando investigaciones acerca de los componentes, que con el paso de los años darían excelentes resultados que permitirían conocer propiedades y características de los materiales utilizados que generalmente eran metales. Hoy en día el campo de la investigación referente a la corrosión de materiales ha adquirido gran auge, debido a que cientos de industrias a nivel mundial tienen grandes pérdidas por deterioro y posteriores fallas de los materiales empleados en los diversos procesos y se ven obligados a reemplazarlos, con el fin de mantener la producción y la integridad de la industria. La necesidad permanente que involucra el mejoramiento y mantenimiento de la eficiencia en la producción a nivel industrial, conlleva a que algunos procesos sean realizados a temperaturas elevadas, exponiendo de esta forma aquellas piezas y partes más cercanas al aumento de calor a una atmósfera oxidante y hostil. En estas condiciones la reacción de corrosión tiene lugar a través de un procedimiento diferente al electroquímico, consistente en una reacción química directa entre el metal y un gas agresivo que normalmente es oxígeno, a este proceso generalmente se le denomina oxidación. (4)

Pero la historia ha mostrado que en el instante que se resuelve una incógnita aparecen nuevos retos, por consecuencia de la evolución y los avances tecnológicos. (2) Este proyecto de grado ha sido orientado a construir un mecanismo para facilitar las pruebas de oxidación cíclica contemplando en el proceso las necesidades que requiere el ensayo, además de simplificar el proceso. El trabajo cuenta con una etapa de diseño que permite realizar una adecuada selección de materiales, posteriormente una etapa de montaje, la cual consiste en la compra, adquisición,

manufactura y ensamble de cada elemento componente hasta obtener físicamente el modelo realizado en el diseño y finalmente una etapa de prueba en que se pone a punto el dispositivo. La importancia del proyecto radica, en que generalmente las piezas de maquinaria la mayoría de ocasiones son sometidas a condiciones extremas de trabajo como pueden ser las temperaturas elevadas a las que están expuestas, por tal motivo, conocer las características y el comportamiento de los materiales bajo estas condiciones es de suma importancia, y se hace posible llevando a cabo pruebas de laboratorio que se realizaran en la Universidad Tecnológica de Pereira, al recurrir a un método artificial para lograr resultados satisfactorios y rápidos, en donde es necesario simular y controlar la temperatura del ambiente en el que se encuentran los materiales, además del tiempo de exposición para cada uno de estos.

## **1. TÍTULO**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO PARA PRUEBAS DE OXIDACIÓN CÍCLICA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un mecanismo para realizar pruebas de oxidación cíclica en Facultad de Ingeniería Mecánica.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 2.2.1 Realizar el diseño de un dispositivo que cumpla con los requerimiento adecuados para llevar a cabo pruebas de oxidación cíclica en el laboratorio de metalografía.
- 2.2.2 Construir el mecanismo realizando la adecuada selección de los diferentes componentes y materiales, tomando en cuenta los factores de seguridad que se requieren. Lo anterior, en base al diseño que fue establecido previamente como la opción más viable para ser materializado.
- 2.2.3 Poner a punto el mecanismo mediante una prueba experimental que permita conocer el comportamiento de este durante un ensayo de oxidación cíclica.
- 2.2.4 Analizar estadísticamente los resultados obtenidos y establecer el comportamiento a diferentes temperaturas y con tiempos de exposición distintos.



### **3. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS**

Para lograr edificar y consolidar el proyecto fue necesario seguir una planeación del mismo, una guía de pasos consecutivos que se inició con una revisión de documentos, la cual brindó luces de cómo realizar un ensayo de oxidación cíclica para de esta forma identificar las necesidades que debían ser suplidas. Este proyecto fundamentalmente se basó en tres etapas principales: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DEL DISPOSITIVO. Orden en el cual se presenta a continuación la información detallada de cada una de estas, con sus respectivas actividades asociadas.

#### **3.1. DISEÑO**

##### **3.1.1. Pasos para realizar un diseño en ingeniería mecánica**

El diseño mecánico es una labor compleja la cual requiere muchas habilidades de tal manera que para su desarrollo requiere ser subdividido en tareas simples. El diseño se aborda desde lo general y de acuerdo a las necesidades y requerimientos se llega a lo particular, este es un proceso iterativo que involucra el uso de varias herramientas computacionales, habilidades y conocimientos en el campo de estudio. Se puede definir el diseño como “Formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema”. Si el diseño termina en el desarrollo de un objeto físico este debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse. La comunicación en el diseño es parte esencial de este ya que se debe relacionar con personas de otras disciplinas con las cuales se debe interactuar para así lograr eficacia y seguridad en su labor.

##### **3.1.2. Fases del diseño**

El proceso de diseño consta de varias fases siendo la primera de ellas la identificación de la necesidad. Esta consiste en determinar lo que se pretende satisfacer mediante el diseño. Una necesidad puede ser una vaga inconformidad, la detección de que algo no está bien o un conjunto de circunstancias aleatorias que se originan de manera casi simultánea. Luego de la identificación de la necesidad se continúa con la definición del problema. Esta fase incluye las especificaciones

del objeto físico que va a diseñarse. Dentro de estas especificaciones se incluyen cantidades de entrada y salida, características, dimensiones del espacio que el objeto debe ocupar, limitaciones sobre estas cantidades, el costo, cantidad de objetos a manufacturar, la vida esperada, la temperatura de operación, la confiabilidad, velocidades, avances, peso, entre otras. Existen otro tipo de especificaciones las cuales están limitadas por los procesos de manufactura, los materiales disponibles en el mercado, entre otras. Luego de definir el problema, posteriormente se pasa a la síntesis, la cual consiste en vincular varias ideas y relacionarlas entre sí. En el proceso de síntesis varios esquemas deben proponerse, investigarse y cuantificarse. Una vez se tienen los esquemas, se evalúa su desempeño y se determina cuales se deben rechazar. Los seleccionados se optimizan para hacer el producto más competitivo. La etapa de análisis y optimización pretende construir modelos abstractos del elemento en desarrollo, que admita alguna forma de análisis matemático, esperando que éstos simulen un comportamiento aproximado de la realidad. Seguidamente, la etapa de evaluación representa una etapa de prueba, en la cual se verifica la funcionalidad, la seguridad, la confiabilidad y la satisfacción de la necesidad identificada en la etapa previa de diseño. Esta etapa permite un proceso iterativo en donde se regresa a las etapas previas. Finalmente, la etapa de presentación del resultado del diseño es dar a mostrar y explicar los logros obtenidos. Claramente, la presentación es una prueba de que la solución que se propone es la mejor. Lo anterior representa todos los pasos necesarios para el desarrollo del diseño en ingeniería. (15)

### 3.1.3 Consideraciones de diseño en el mecanismo para pruebas de oxidación cíclica

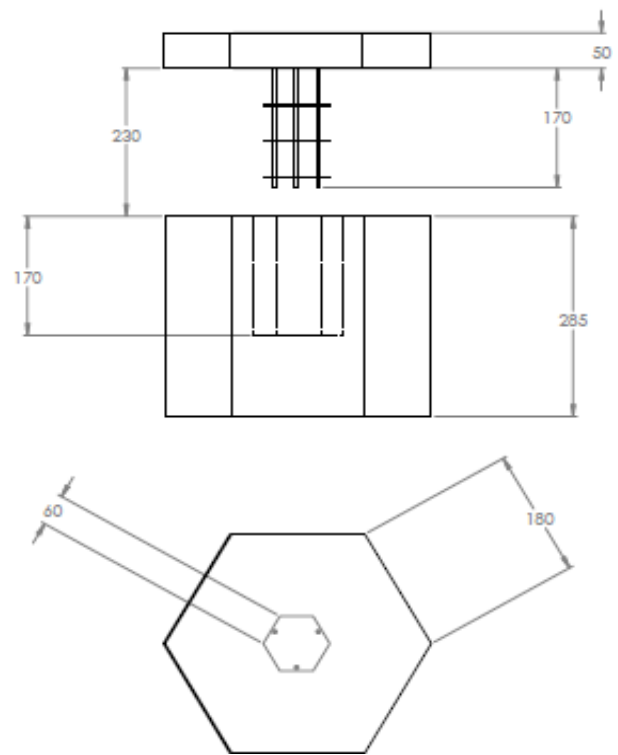
En los ítems siguientes, se considera la teoría general de oxidación cíclica y el estudio de los parámetros involucrados en el comportamiento de los materiales que se corroen por medio del oxígeno y otros factores, así como los métodos buscados para la solución del problema existente. Luego de haber realizado una introducción acerca de las fases en el proceso, dado su importancia en el diseño de cualquier elemento de máquina, mecanismo o sistema mecánico, se pasa a considerar todo lo concerniente con el estudio particular del mecanismo para pruebas de oxidación cíclica, es decir, sus características geométricas, proceso de diseño, control de variables, la selección de materiales y finalmente el montaje del mecanismo.

#### 3.1.4 Descripción y características de la estructura

Debido a que las pruebas de oxidación cíclica pueden regirse por diversos protocolos con diferentes tiempos de exposición establecidos, o en nuestro caso un ensayo determinado por un ciclo de 60 minutos a una temperatura elevada y estable de 600 grados Celsius, dividido a su vez el ciclo en 50 minutos dentro del horno y 10 minutos fuera de este, con probetas de acero de caldera (ASTM A53 GRADO B), y que en la mayoría de los casos dichas pruebas son demasiado extensas, la idea principal debía consistir en un dispositivo que realizara el proceso automáticamente instalado y/o adaptado a las dimensiones y geometría del horno; para esto, en primer lugar, se requería de una estructura que soportara el horno y al mismo tiempo sirviera para darle estabilidad al mismo, y en segundo lugar, dicha estructura sirviera para anclar los elementos que brindarían el adjetivo de “automático” al horno, además, la altura del horno debería estar entre 40 cm y 50 cm, todo con el fin de que el cilindro neumático tenga el suficiente espacio en su parte trasera, la cual es larga debido al recorrido que hace el vástago. La estructura fue hecha en ángulos en “L” de 2” con un espesor de 3/16” ya que este acero es capaz de soportar el peso del horno y además permite un maquinado relativamente fácil, es decir, permite realizar la fijación del cilindro. El cual, además de levantar la tapa del horno a la cual se adaptó una canastilla hecha en acero inoxidable AISI 304 y recubierta de cemento refractario especial para recubrir metales, capaz de soportar una temperatura de 900 grados Celsius y el peso de 15 probetas, es decir un peso aproximado de 50 gramos ya que cada probeta pesa alrededor de 3,2 gramos, que ingresa a un agujero en el horno con diferentes probetas de estudio, el cilindro también deberá realizar movimientos repetitivos con lapsos de tiempo establecidos por la persona encargada del ensayo, movimientos que introducen y retiran las probetas del agujero para lograr de esta manera replicar los ciclos. El ingreso de las probetas al horno se hace en un espacio reducido por lo tanto es necesario tener un recorrido vertical y lineal en la canastilla para que no presente problemas de fricción con la pared y resistencias que posee el agujero del horno. La geometría y medidas del horno se muestran en la figura 1, y la estructura que lo soporta se muestra en la figura 2. Resumidamente, el diseño elegido consiste una estructura que servirá de apoyo para un cilindro, que con el alcance de su vástago va a simular un brazo neumático que sube y baja la tapa del horno, para de esta forma introducir y retirar las probetas de la fuente de calor ubicada en el agujero.

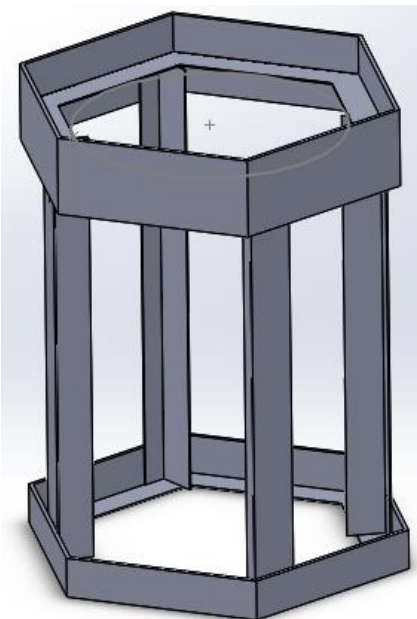


A. Geometría del horno



B. Medidas del horno en mm

Figura 1. Horno eléctrico que se adecua, para la prueba de oxidación cíclica



A. Diseño tridimensional de la base



B. Base real del horno

Figura 2. Base para el mecanismo de oxidación cíclica

### 3.1.5. Control de las variables en el sistema

Para realizar pruebas de oxidación cíclica se requiere básicamente de un horno ya existente, que eleva la temperatura, permaneciendo constante durante la prueba, sin embargo, las probetas analizadas si requieren una variación de temperatura durante el transcurso del tiempo, lo que complica llevar a cabo el proceso, ya que el material estudiado debe permanecer un lapso de tiempo establecido previamente dentro del horno y un periodo de duración fuera de este. A cada etapa de variación en la temperatura del material (calentamiento y enfriamiento) se le conoce como ciclo; la dificultad que se tiene para la realización del ensayo, radica entonces en buscar un método que permita acondicionar el horno para llevar a cabo pruebas con diferentes ciclos y diferentes temperaturas según el protocolo elegido para el estudio a realizar. Se tiene entonces que el proceso de oxidación cíclica es fundamental para determinar la utilidad y el comportamiento de los materiales en condiciones de trabajo hostiles. Y considerando que el tiempo y la temperatura son los factores de control principales, se pretende recurrir a un elemento que satisfaga las necesidades y cumpla las expectativas, por esto la opción de "AUTOMATIZACIÓN" del mecanismo para lograr resultados satisfactorios, seguros y rápidos sin necesidad de hacerlo de una forma manual, es el método ideal. El control de estas variables (Temperatura y tiempo de exposición) se logra mediante un mecanismo que permita la realización de la prueba de oxidación cíclica, este mecanismo permite la continuidad y el normal progreso del ensayo, cuyos resultados ampliarán los conocimientos en el área de los materiales, mostrando el comportamiento de estos frente a la oxidación a altas temperaturas.

### 3.1.6. Método de automatización

La automatización brinda ciertas ventajas y beneficios de orden económico, social, y tecnológico, pudiéndose resaltar las siguientes (14): se asegura una mejora en la calidad del trabajo del operador y en el desarrollo del proceso, se obtiene una reducción de costos puesto que se racionaliza el trabajo, se reduce el tiempo y dinero dedicado al mantenimiento, además, aumenta en la seguridad de las instalaciones y la protección hacia los usuarios. El proceso de automatización consta de un cilindro que hala la canastilla con las probetas a la superficie en un determinado tiempo, para esto se utiliza un cilindro que ejerza una fuerza mayor a 25 N, ya que el peso aproximado que se requiere levantar es de 2,5 kg distribuidos entre el peso de la tapa

y el de la canastilla con las probetas. Además se necesita un compresor que alimente este sistema neumático. Lo mencionado anteriormente, se fundamenta en los siguientes cálculos, en los cuales se especifica la presión que debe entregar el compresor y también el área del vástago que se requiere para levantar dicho peso.

### 3.1.7. Cálculos necesarios para la selección del cilindro y el compresor

Para realizar estos cálculos, en primer lugar se recopilan los datos de los pesos de la tapa, la canastilla y las probetas, los cuales fueron los siguientes:

TAPA= 2 kg

CANASTILLA Y PROBETAS= 500 grs

Peso que se necesita levantar:

$$1. \quad w = 2,5 \text{ kg} * 9,8 \frac{m}{s^2} = 19,6 \text{ N}$$

Por motivos de manejar un factor de seguridad se incrementa el peso que debe levantar el cilindro hasta los 25 N y suponiendo una presión de trabajo del cilindro de 100 psi:

$$2. \quad P = \frac{F}{A} \quad A = \frac{25 \text{ N}}{689,5 \text{ kpa}} = 0,0000363 \text{ m}^2 = 36,3 \text{ mm}^2 \quad . \text{Área del cilindro}$$

con 100 psi de presión de trabajo.

$$3. \quad A = \frac{\pi}{4} * (D^2) = 36,3 \text{ mm}^2$$

D= 6,794507 mm. Diámetro que debe tener el cilindro seleccionado.

La fuerza que debe ser soportada por parte del cilindro debe ser de 25 N ejercida por el peso de la tapa y la canastilla, entonces para la selección del cilindro se necesita un diámetro mínimo de 6,794507 mm con una presión de 100 psi. Ya realizada la distribución de espacio en el mecanismo se verifica la carrera que debe tener el cilindro para que no exista transferencia de calor entre las probetas y el horno, para esto debe tener una distancia como mínimo de 30 cm, conocidas las características que debe poseer el pistón para la selección y de tal manera que cumpla con los requerimientos deseados, el cilindro a escoger es entonces un cilindro con carrera

de 50 cm y el diámetro es de 40 mm, diámetro muy superior al calculado, pero esto se debe a que comercialmente no existe un elemento de tal carrera y un diámetro tan inferior. Este ajuste al diámetro no es relevante si se considera un factor de seguridad por encima del 1,4 en la carrera y de 6,5 en el diámetro del cilindro, así, el montaje se hace de una manera segura y confiable. Con el cilindro seleccionado se establece que el rango de presiones en las que trabaja el elemento se encuentra entre 14 psi y 130 psi según las especificaciones del fabricante, lo cual es de suma importancia en la escogencia de un compresor adecuado.

### 3.2. CONSTRUCCIÓN

#### 3.2.1. Canastilla

La canastilla cumple la función de soportar las probetas que ingresan al horno de oxidación cíclica, que debido a las altas temperaturas a las que será expuesta junto con las probetas, esta debe poseer ciertas características, más concretamente, resistencia a la oxidación y resistencia mecánica para soportar el peso de los materiales analizados. Para su construcción se utiliza un acero inoxidable AISI 304 que en sus cualidades se encuentran las mencionadas anteriormente; posterior a conocer la materia prima para la elaboración de la canastilla, se realiza un diseño simple pero apto para la labor establecida, el cual consiste en un eje o columna principal en la que se soportan unas platinas con forma de hexágono, geometría dada por la forma del agujero del horno y cuyas medidas laterales orientaron en las medidas de los hexágonos de la canastilla.

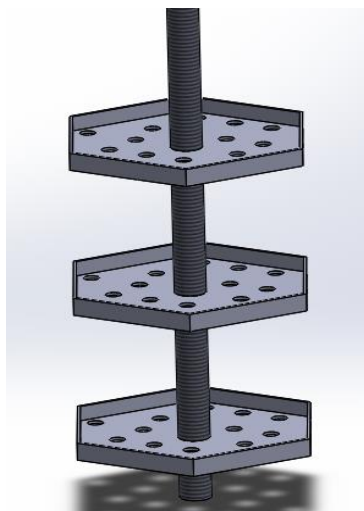


Figura 3. Diseño de la canastilla

### 3.2.2. Selección de materiales

En esta etapa se eligen los materiales necesarios para la construcción del mecanismo, en base a los cálculos realizados previamente. Los cuales permitieron establecer los parámetros y características necesarias de los elementos; ya con estudios más a fondo de cada uno y denominando su función dentro del proyecto, se procede a la obtención de estos para su instalación y ensamble. Para esto, se solicita la colaboración del Ingeniero Ricardo Acosta quien aporta su experiencia y orientación para tener una mejor visión del método de automatización, los materiales seleccionados se nombran a continuación:

#### 3.2.2.1. Cilindro neumático:

Cilindro neumático con un diámetro de 40 mm y una carrera de 500 mm, con rango de operación entre los 14 psi y los 130 psi de presión, este dato es muy importante ya que es la base para seleccionar el compresor. La carrera o extensión del vástago garantiza que no exista transferencia de calor entre la plataforma donde se ubican las probetas y el horno, o que esta sea reducida de forma drástica. El cilindro neumático además, cumple un objetivo primordial dentro del proyecto, ya que sin este no sería posible el desplazamiento de los objetos de prueba y por consiguiente no se podría tener una variación cíclica de las temperaturas.



Figura 4. Cilindro neumático

#### 3.2.2.2. Compresor:

Compresor CRAFTSMAN que alcanza 125 psi de presión máxima, con 1 HP de potencia y 3 Galones de almacenamiento. Características apropiadas que cumplen con los requerimientos



generados por el cilindro neumático, el cual como ya se mencionó, tiene un rango de operación de presión entre 14psi y 130psi. La fuente de alimentación del compresor es de 110 V y el ciclo de trabajo de este consta de 40 minutos de trabajo continuo por 30 minutos de reposo. Las características anteriores se suman al requerimiento principal de selección del mismo, la presión que entrega el compresor, la cual es de 125 psi, superior a la que fue calculada por la ecuación (2) en la cual, se ve claramente que la presión supuesta de alimentación es de 100 psi para el cilindro, de este modo, se considera entonces un factor de seguridad de 1.25 para que no exista una sobrecarga del elemento en el circuito electro-neumático.



Figura 5. Compresor CRAFTSMAN

#### 3.2.2.3. Válvula solenoide 5x2:

El 5x2 en el nombre de la válvula hace alusión a que posee 5 vías o conductos y 2 posiciones. Esta válvula se selecciona debido a que la automatización del mecanismo diseñado se hará de forma electro-neumática, es decir, se lleva a cabo una combinación de sistemas eléctricos con sistemas neumáticos, lo cual es posible gracias a la válvula solenoide que interconecta los dos circuitos al recibir una señal o un pulso eléctrico que indica a la válvula por cuál de los dos conductos de salida debe permitir el paso del aire. Resumidamente, lo que se pretende es activar el movimiento del cilindro en una dirección u otra según lo requiera el proceso, motivo por el cual esta válvula es fundamental en la construcción del mecanismo, además de las ventajas que ofrece respecto a otras válvulas sin solenoide, ya que trabaja en forma silenciosa, larga vida útil,

fácil mantenimiento y la activación manual de la misma, un factor importante en cuanto a la seguridad del usuario se refiere.



Figura 6. Válvula 5x2 con solenoide

#### 3.2.2.4. Cofre:

Este es un cajón metálico, donde está ubicada toda la parte eléctrica, cables, relevos, breakers, fusibles y los aditamentos necesarios para el circuito, en el cofre además, se instala el contador de ciclos y el temporizador. Es un elemento útil y necesario para dar protección y organización a los componentes que en él se encuentran y de este modo centralizar los controles del mecanismo construido para su correcto funcionamiento. Trae ventajas a la hora de realizar un mantenimiento, ya que los elementos se encuentran distribuidos de tal manera que se pueda tener un acceso rápido y seguro, o llegado el caso dar pronta solución a un imprevisto.



A. Parte interior del cofre



B. Parte exterior del cofre

Figura 7. Cofre metálico que alberga el sistema eléctrico y de control

#### 3.2.2.5. Riel omega:

Este elemento es un accesorio necesario para dar soporte y fijación a los relevos y el breaker, por tal motivo se toma como parte del sistema eléctrico. Gracias al riel omega se logra la distribución de los componentes en el interior del cofre y por consiguiente la organización del cableado del sistema.



Figura 8. Riel omega

#### 3.2.2.6. Unidad de mantenimiento:

La unidad de mantenimiento es un dispositivo que tiene como objetivo detener las impurezas que arrastra el aire comprimido (polvo, polen, restos de pequeñas oxidaciones, etc.) logrando así que el aire que llega al cilindro sea lo más puro posible alargando la vida útil del elemento y garantizando su normal funcionamiento. Adicionalmente, estas unidades poseen una perilla reguladora, la cual al manipularla permite controlar la presión del aire comprimido hacia el sistema, protegiendo de este modo los accesorios y elementos del sistema neumático de sufrir una sobrepresión. Finalmente, se tiene incorporado a la unidad un lubricador que asegura un paso de aire estable y uniforme a través de los accesorios, logrando el tránsito libre sin obstrucciones. Lo anterior, expresa el principio básico de la unidad de mantenimiento, filtrar, regular y lubricar el aire que ingresa al sistema y componentes, prolongando la vida útil de los elementos involucrados.



Figura 9. Unidad de mantenimiento

### 3.2.2.7. Relevador y base:

El relé o relevador es un elemento electromecánico que se utiliza para abrir o cerrar circuitos eléctricos funciona como interruptor de la solenoide en la válvula y se comporta como un amplificador eléctrico. Para la automatización del sistema, se escogen dos relevadores de 11 pines con su respectiva base, los cuales están interconectados de modo que el contador de ciclos obtenga así el conteo de repeticiones deseado y el temporizador asimétrico envíe la señal de apertura o cierre de conductos a la válvula solenoide según sea el caso. La base del relé actúa como un puerto al que llegan unos cables y salen otros, permite el anclaje de los cables de interconexión con otros relés o demás elementos que requieran estar enlazados.



Figura 10. Relevador y base

#### 3.2.2.8. Temporizador asimétrico:

Se utiliza un temporizador asimétrico, el cual permite realizar las funciones de dos temporizadores comunes, lo anterior se debe a que se necesita establecer un tiempo con las probetas al interior del horno y otro lapso de tiempo con las muestras de prueba fuera de él. El temporizador seleccionado posee dos perillas que controlan el tiempo para cada situación mencionada y cada una de las perillas cuenta con un rango de ajuste entre 1 y 60 minutos, tiempo de ajuste ideal ya que el ciclo establecido para las probetas es de 50 minutos al interior del horno y 10 minutos en el exterior. Al igual que el relevador, también se requiere de una base acoplada al temporizador que permita el posicionamiento de los cables para interconectar los elementos.



Figura 11. Temporizador asimétrico

#### 3.2.2.9. Contador:

El contador es un elemento fundamental a la hora de lograr la automatización del mecanismo, ya que en él se lleva a cabo un conteo exacto de los ciclos, además de permitir la programación del mismo y establecer la cantidad de repeticiones que el dispositivo debe realizar según lo deseado para la prueba. Este contador es seleccionado por la gran cantidad de ciclos posibles a programar gracias a que cuenta con 6 dígitos en su panel de control, lo anterior, elimina la posibilidad de programar una prueba con pocos ciclos, lo que sería una limitante al momento de realizar estudios más prolongados.



Figura 12. Contador

#### 3.2.2.10. Fuente de alimentación:

Componente principal en el circuito, ya que sin esta ninguno de los demás elementos funciona. La fuente que se escoge, es una fuente de alimentación a 24 V marca EBCHQ y energiza los dos elementos principales del sistema eléctrico (temporizador asimétrico y contador) a 24 V, una tensión relativamente baja que se decidió que fuera de este modo, para proteger el usuario de un choque eléctrico fuerte en caso de emergencia. Pero la principal característica de la fuente es recibir un voltaje de 110 V o 220 V, tensiones que normalmente las brinda un toma corriente común y transformarlo en 24 V. Lo anterior, facilita el uso de los componentes del circuito ya que no se debe realizar ninguna instalación o modificación eléctrica adicional.



Figura 13. Fuente de 24 V

#### 3.2.2.11. Breaker:

El disyuntor eléctrico, conocido coloquialmente como breaker o taco, es un elemento de seguridad que protege los elementos del circuito de una sobrecarga, logrando extender la vida útil de estos al no permitir que se quemen. Este interruptor automático, abre el circuito una vez la corriente que circula por este excede determinado valor, o cuando en el sistema eléctrico se produce un cortocircuito. El breaker seleccionado, tiene un tope de 4A como corriente máxima, si en algún momento esta es superada y se activa la protección, es posible rearmar el disyuntor una vez reparado el problema.



Figura 14. Breaker

#### 3.2.2.12. Borneras:

Un borne es una parte metálica dentro del circuito, donde se produce una conexión eléctrica. Un punto en común o nodo, para unir los componentes que lo requieran, a través de los terminales que se encuentran ubicados en la bornera. Facilita la distribución del cableado en el cofre, mejorando la organización. Además, en caso de mantenimiento del cableado del circuito se puede reconocer fácilmente que elementos deben estar conectados y en que puerto de entrada y salida.



Figura 15. Borneras



### 3.2.2.13. Encauchetado tripolar:

El encauchetado tripolar utilizado en la automatización del mecanismo, me permite conectar los elementos del circuito que requieren del flujo continuo de corriente eléctrica. Se compone de tres cables de determinado calibre, al interior de una protección de caucho para evitar el contacto del usuario con estos, evitando de este modo un accidente por choque eléctrico. El calibre de los cables en el encauchetado depende de la intensidad de la corriente que transita por ellos, lo cual fue un ítem que se tomó en cuenta para su selección. Este elemento se utiliza para garantizar las condiciones mínimas de seguridad en cualquier circuito eléctrico donde se quiere asegurar la calidad de las instalaciones.

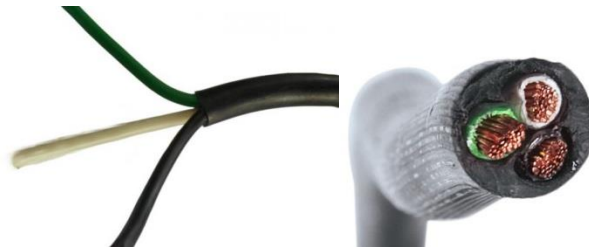


Figura 16. Encauchetado tripolar

### 3.2.2.14. Clavija hembra y clavija macho:

La clavija macho es una pieza de material aislante de la que sobresalen tres polos, que se acoplan perfectamente con los tres orificios de la clavija hembra. De este modo, se establece una conexión eléctrica que permite el funcionamiento de los artículos ubicados en el cofre. De la clavija hembra se extiende un cable cuyo objetivo es obtener la tensión necesaria de un tomacorriente, para mantener energizados los elementos de automatización, mientras que la clavija macho posee un cable que está ligado a los elementos eléctricos del cofre. Así, al unir las dos clavijas se obtiene un flujo constante de corriente eléctrica que se puede interrumpir manualmente cuando se lo requiera.



Figura 17. Clavijas hembra y macho



#### 3.2.2.15. Pulsador de contacto normalmente abierto:

Este elemento sirve para enviar una señal o pulso eléctrico al circuito al momento de ser activado, en términos generales, el pulsador es un punto de unión en donde las partes conectadas a él se encuentran separadas y solamente se unen al presionar el elemento, por consiguiente, se cierra el circuito accionando los componentes utilizados en la automatización del mecanismo, dando inicio al movimiento de la parte mecánica.



Figura 18. Pulsador de contacto normalmente abierto

#### 3.2.2.16. Selector de dos posiciones:

El selector es un elemento que se acciona manualmente y su principio de funcionamiento es el mismo que el del pulsador normalmente abierto. La única diferencia, es que el selector cierra el circuito eléctrico por tiempo indeterminado y para abrirlo nuevamente también debe hacerse de forma manual, dando de este modo una señal de continuidad al sistema para que inicie el proceso para el que está destinado o lo termine según sea el caso. Mientras que el pulsador normalmente abierto cierra el circuito hasta que el proceso termine y para reiniciarlo se debe oprimir nuevamente el botón. En el mecanismo construido, el selector activa el contador de ciclos y lo mantiene activo durante toda la prueba de oxidación cíclica.

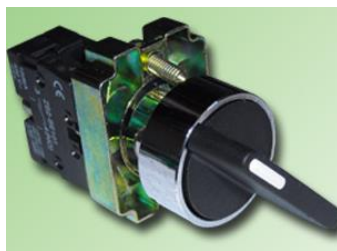


Figura 19. Selector de dos posiciones

### 3.2.2.17. Racores y silenciadores:

Los racores aunque son piezas pequeñas y simples, son de gran utilidad en la conexión del sistema neumático. Estos, permiten unir de manera rápida los elementos que se deben interconectar como lo son la unidad de mantenimiento, la válvula solenoide y el cilindro, a través de la manguera de automatización. Este elemento brinda una sujeción firme y segura de la manguera a los accesorios sin permitir fugas de aire que afecten el flujo constante de aire. Los silenciadores, como su nombre lo indica, ayudan a reducir el ruido producido por la válvula solenoide, cuando esta permite la salida de aire comprimido del sistema neumático. Poseen, un adaptador roscado el cual permite el fácil acople con el equipo.



A. Racores



B. Silenciadores

Figura 20. Accesorios de conexión del sistema neumático

### 3.2.2.18. Manguera de automatización:

Comunica los elementos que hacen parte del sistema neumático y la selección del diámetro de esta es fundamental, ya que se debe garantizar un caudal de aire estable que permita el óptimo funcionamiento de los componentes neumáticos, además de soportar la presión de trabajo. La manguera que se escoge en la construcción, tiene un diámetro de 8mm y soporta una presión entre 0 y 150 psi, lo cual se encuentra en el rango de trabajo adecuado, ya que la presión máxima del compresor es de 125 psi, por consiguiente, se encuentra preparada para las presiones de trabajo a las que será sometida durante el ensayo.



Figura 21. Manguera de automatización

### 3.2.2.19. Paro de emergencia:

El paro de emergencia utilizado en el mecanismo, es importante en razón de la seguridad del usuario y de la correcta realización de la prueba de oxidación cíclica, ya que al ser activado interrumpe por completo la realización del ciclado y mantiene extendido el vástago del cilindro neumático, posicionando de esta forma las probetas del ensayo afuera del horno, permitiendo ajustes de último momento. Su principio de funcionamiento básicamente es el mismo de un selector, que al pulsarlo mantiene el circuito cerrado realizando la acción deseada por quien lo instaló y se desactiva dándole un pequeño giro en sentido horario, retornando al ciclado normal del mecanismo. En cuestión de seguridad de quien manipula el equipo, el interruptor debe estar visible y disponible en todo momento para su utilización inmediata.



Figura 22. Paro de emergencia

### 3.2.2.20. Válvula reguladora:

Esta válvula controla la presión del aire de acuerdo a los requerimientos y necesidades que se tengan, gracias a esto se puede regular la velocidad del cilindro neumático. La válvula seleccionada, soporta presiones hasta los 130 psi, es decir, es adecuada para el trabajo al que será sometida ya que la presión máxima que podría alcanzar el compresor del sistema neumático es de 125 psi. Además, posee la característica de ser anti-retorno y solo permite el paso del aire en un sentido, logrando de este modo que el compresor no permanezca en funcionamiento.



Figura 23. Válvula reguladora

### 3.2.3. Horno eléctrico marca Terrígeno

El horno eléctrico que se utiliza en la prueba, se convierte en el centro del proyecto ya que el objetivo principal es la automatización del mismo, para lograr realizar pruebas de oxidación cíclica. Sin este componente, las demás actividades y tareas realizadas no tienen razón de ser, debido a que los diseños creados están inspirados en la geometría y dimensiones del horno. Este elemento utiliza resistencias eléctricas en forma de espiral, generando de este modo un flujo de corriente a través de ellas, así, se logra un calor envolvente mejorando el desempeño del equipo para alcanzar la temperatura que se indique en su panel de control; con un rango de temperaturas programable desde 0 °C hasta los 1000 °C. La forma y dimensiones del horno se observa en la figura 1.

### 3.2.4. Ensamble del mecanismo

El ensamble del mecanismo consta de tres partes fundamentales, cada una de ellas pensada como la solución adecuada, para lograr el objetivo trazado. La automatización del horno está compuesta por el sistema mecánico, capaz de realizar las acciones programadas por el circuito eléctrico diseñado. La parte mecánica, logra lo anterior siendo accionado por todo el equipo neumático, conectados entre sí por medio de mangueras, y a su vez el sistema eléctrico enlazado con el sistema neumático en la válvula solenoide, permitiendo el movimiento que se buscaba para el correcto funcionamiento del dispositivo. Esto indica, que se cuenta con 3 etapas de construcción, cada una obsoleta sin el adecuado funcionamiento y perfecta instalación de las demás.

#### 3.2.4.1. Sistema eléctrico:

En primer lugar, para desarrollar el sistema eléctrico del mecanismo, el cual permitiría realizar automáticamente el movimiento del cilindro neumático cada determinado tiempo, fue necesario utilizar una herramienta virtual llamada FLUIDSIM de la autoría de la empresa FESTO. En ella, se elabora un circuito eléctrico, en donde se utilizan los elementos que se consideran apropiados para realizar dicha labor. Al finalizar el montaje del circuito, se procede a realizar una simulación del funcionamiento del mismo, verificando que los elementos escogidos son aptos para la tarea encomendada. Lo anterior, fue posible anexando el diseño de un sistema neumático, del que se hablara más adelante, acoplado al circuito eléctrico. En la simulación, se observa el movimiento

repetitivo del cilindro, tal como se desea, al dar la orden de inicio a los componentes eléctricos. Esta tarea, oriento de manera crucial la selección de materiales y se pudo verificar cuales debían ser solicitados para la construcción del mecanismo. Posteriormente, cuando se tiene los materiales en físico, elegidos para el sistema eléctrico, se realiza su instalación y montaje interconectándolos por medio de cables como se muestra en la figura 7a (Parte interior del cofre), guiados por el plano del circuito y siguiéndolo estrictamente. Se anexa el plano del circuito eléctrico utilizado en la automatización del dispositivo, figura 23.

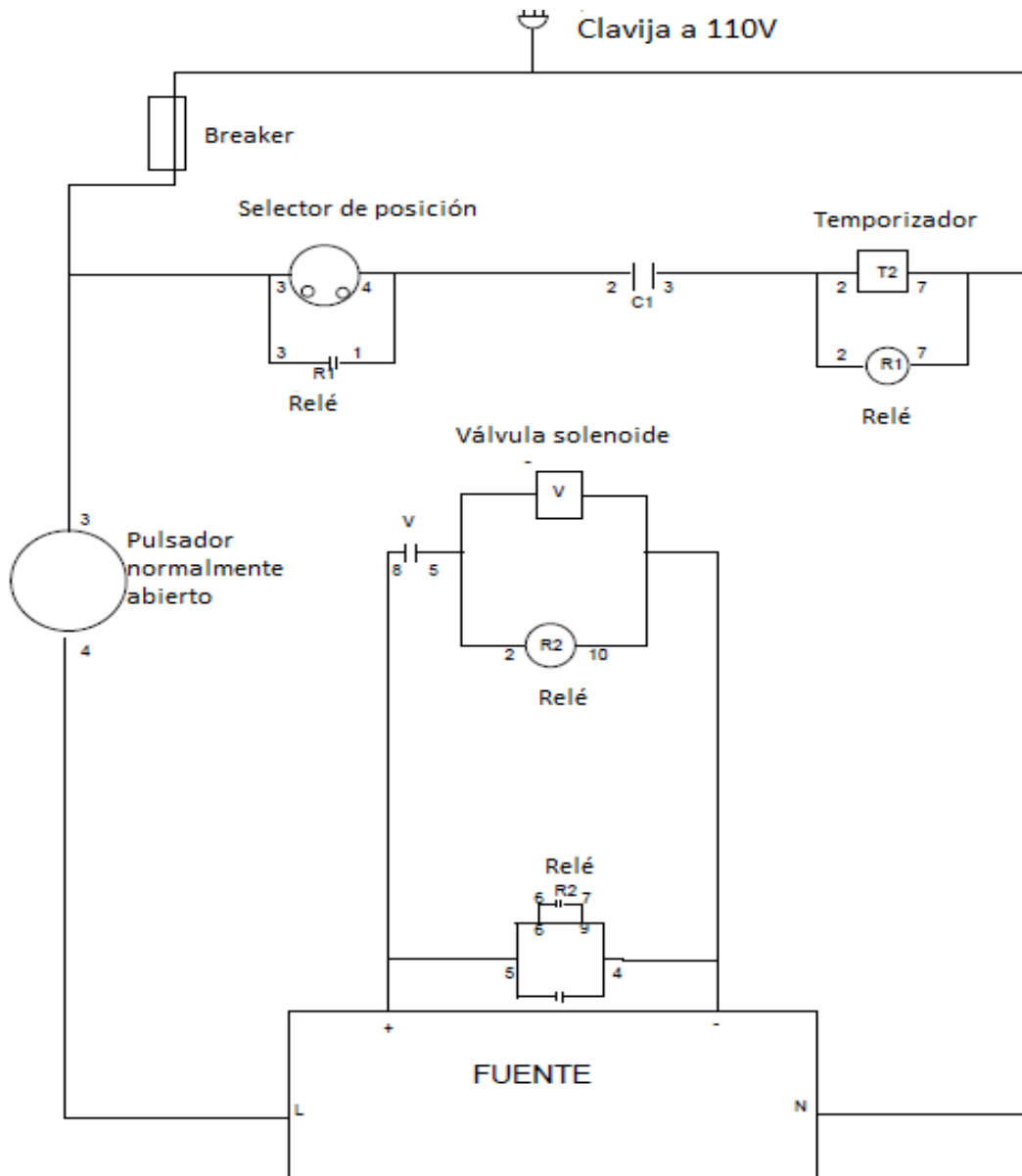


Figura 24. Plano del circuito eléctrico

#### 3.2.4.2. Sistema neumático:

De igual manera que el sistema eléctrico, se inició con una simulación en FLUIDSIM, programa en el cual se tenía un diseño previo del circuito, el cual necesitaba el acople de los elementos neumáticos para lograr recrear el movimiento. Se comprueba que el sistema neumático funciona al recibir las órdenes del circuito eléctrico, lo que garantiza que los elementos instalados en el circuito neumático simulado son los ideales, y debe ser solicitada su compra para su conexión y acople con los demás sistemas. Se observa entonces, que el procedimiento llevado a cabo para obtener los sistemas eléctrico y neumático es el mismo, asegurando así, que los elementos adquiridos en etapas anteriores, simplemente requieren estar conectados entre ellos para funcionar correctamente. La instalación y acople del sistema neumático, se realiza de manera simple pero eficiente; en primer lugar, se tiene el compresor el cual necesita permanecer en un ambiente de trabajo relativamente limpio, conectado a la corriente eléctrica durante toda la prueba, esto no quiere decir que esté en funcionamiento todo el tiempo, ya que gracias a las válvulas anti-retorno instaladas tiene periodos de descanso. Conectado al compresor, se sitúa la unidad de mantenimiento que filtra, regula y lubrica el aire garantizando un flujo constante a través de los conductos con la presión deseada. Después de la unidad, se ubica la válvula solenoide, la cual está anclada a la base que soporta el horno, desprendiéndose de esta, dos mangueras que llevan el aire hasta el cilindro neumático. La primera, se ubica en la parte inferior del cilindro e impulsa la salida del vástago y la segunda se instala en la parte superior del cilindro y es la encargada del ingreso del vástago. Posicionadas, entre el cilindro y la válvula solenoide se encuentran dos válvulas reguladoras con anti-retorno las cuales me permiten graduar la velocidad de ingreso y salida del vástago del cilindro, ayudando a controlar las condiciones de trabajo del equipo. Todo lo anterior, está interconectado gracias a la manguera de automatización de 8 mm y los racores acordes a la medida del conducto seleccionado.

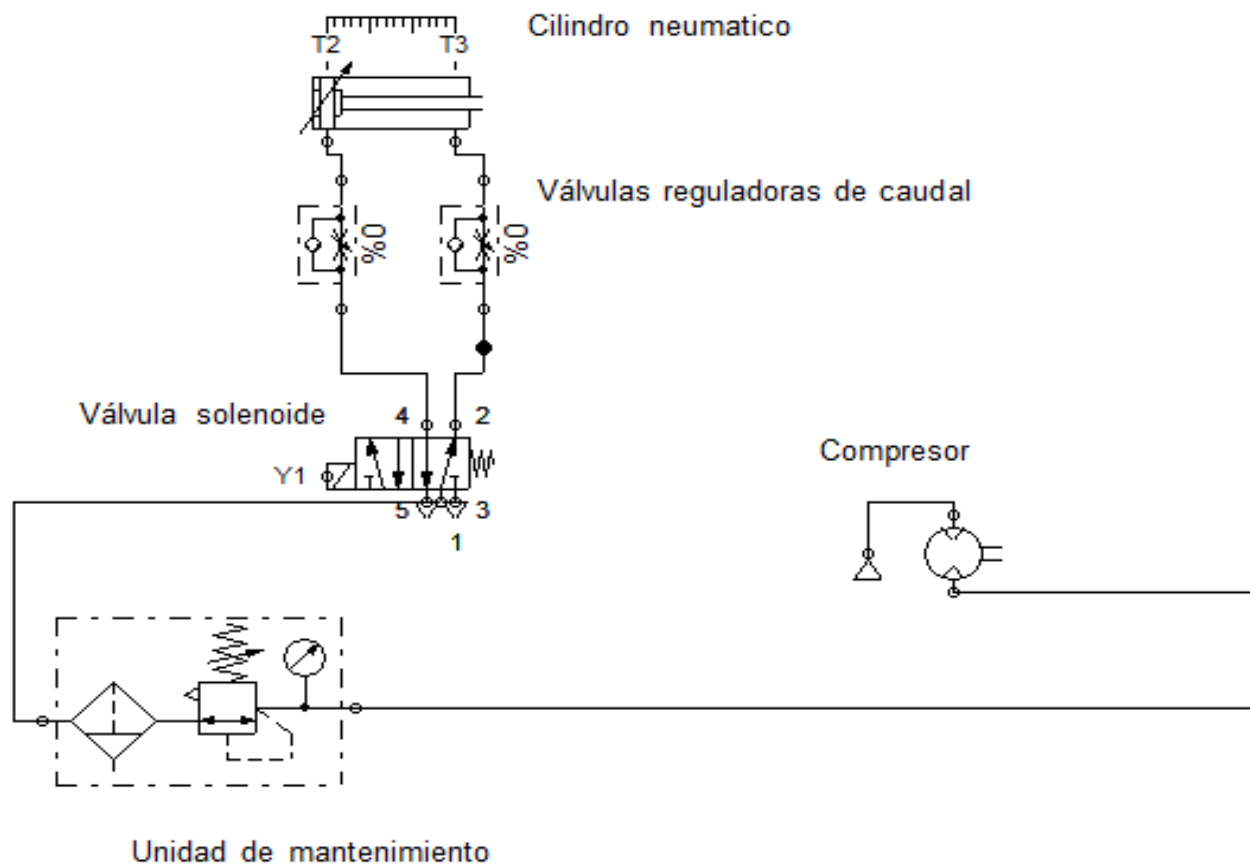
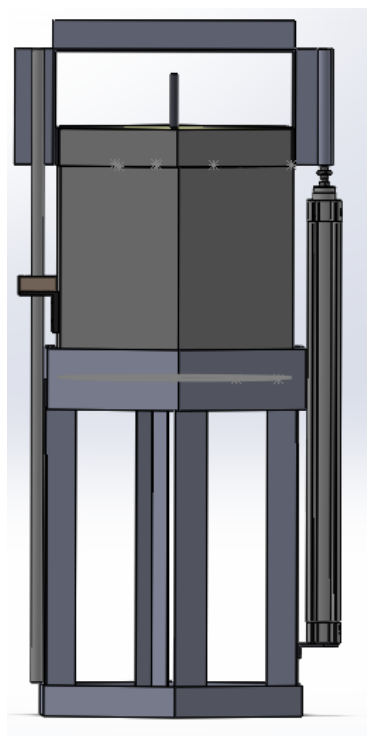


Figura 25. Plano del sistema neumático

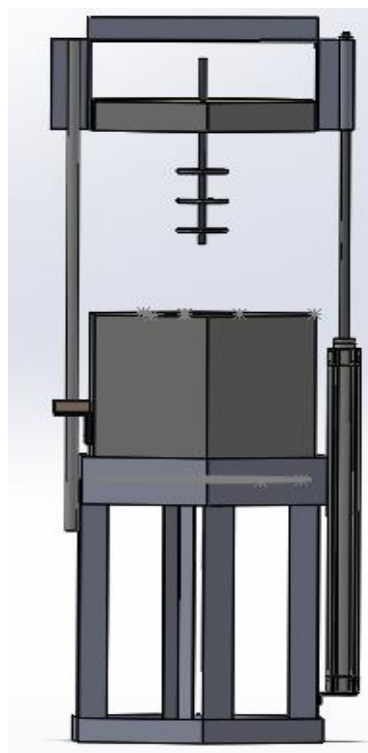
#### 3.2.4.3. Sistema mecánico:

Esta etapa final del ensamble, es aquella donde el cilindro se deja bien anclado a la base del horno y además, se garantiza que el cilindro y la tapa estén unidos por la parte superior, mediante la sujeción firme de la tapa al vástago por medio de un soporte metálico robusto. Esto, para que cuando se genere el movimiento de extensión y retracción del brazo del cilindro, la tapa lo haga de igual forma y al mismo tiempo. Con lo anterior, se logra la entrada de la canastilla al agujero del horno para la correcta realización de la prueba, debido al movimiento lineal de arriba abajo que se obtiene en esta. La canastilla se encuentra unida a la tapa del horno, gracias a un esparrago que hace el papel de columna, soportando tres plataformas hexagonales en la parte inferior, cada una separada 5 cm de la otra y en donde se ubican las probetas. La parte superior del esparrago, atraviesa la tapa en el centro de esta y con arandelas y tuercas se fija, dándole el ajuste y posicionamiento requerido. Para garantizar que la canastilla ingrese sin contratiempos en

el orificio, se debe asegurar el desplazamiento firme de la tapa, lo cual se logra mediante un riel y un buje ubicados a 180° del cilindro que sirven de guía para el movimiento. Esta etapa del ensamble es crucial para el funcionamiento correcto del mecanismo ya que de no alinear el cilindro con la tapa, el desplazamiento de esta no sería el adecuado. Sin embargo, lograr el perfecto acople de la tapa con el horno no es posible ya que no poseen las mismas dimensiones, haciendo que el movimiento y el posicionamiento del cilindro, buje, riel y tapa deban ser ajustados. Resumidamente, el montaje mecánico de la estructura de soporte se hizo teniendo la base del horno como punto central, en donde se ubica el cilindro por medio de un soporte en la parte inferior de este y en la parte superior una abrazadera que evita movimientos no deseados en el cuerpo del cilindro. Posteriormente, se realiza el montaje de la tapa al vástago utilizando un soporte hecho de un ángulo en L y el montaje de la canastilla a la tapa gracias al eje mencionado. Adicionalmente, en la base del horno se pone el paro de emergencia del equipo, dando fácil acceso a este en caso que se deba utilizar y la válvula solenoide, para reducir la distancia de separación de las mangueras con el cilindro y evitar fugas de aire o pérdidas de presión.



A. Mecanismo con el cilindro retraído



B. Mecanismo con el cilindro extendido

Figura 26. Diseño del sistema de soporte



### 3.2.5. Terminados y acabados

Es la etapa complementaria al ensamble y en ella, se procede a dar los retoques estéticos y de acabados superficiales a la parte mecánica. Se agrega pintura a las estructuras metálicas, que soportan el horno y la tapa, dándoles una apariencia similar a la del horno para no desentonar, además, se refuerzan con puntos de soldadura las uniones en estas para dar firmeza y tener un sistema de soporte robusto, brindando estabilidad al equipo. En cuanto a la canastilla, se le dio una capa de recubrimiento con cemento refractario, para extender su vida útil en el mecanismo, protegiéndola de las condiciones extremas de trabajo a las que será sometida junto con las probetas de ensayo.

## 3.3. PRUEBA DEL MECANISMO

El objetivo principal del proyecto, es construir un mecanismo el cual sirva para realizar pruebas de oxidación cíclica en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, por consiguiente, la única forma de comprobar si el dispositivo diseñado y ensamblado es apto para el trabajo, es realizar una prueba de oxidación cíclica a altas temperaturas que, además de ayudar en la puesta a punto del equipo, también sirve para observar el comportamiento e incremento de la oxidación en probetas de acero de caldera ASTM A213 T22, durante un tiempo de exposición y temperatura establecidos. Simulando de este modo, el ambiente hostil al que está expuesta la aleación durante las jornadas de trabajo en la caldera. Lo anterior, se logra al realizar un análisis estadístico del incremento de óxido en las probetas y observando la microestructura de estas con el microscopio electrónico de barrido.

### 3.3.1. Oxidación cíclica a altas temperaturas

Cuando un metal es expuesto a algún gas oxidante a temperaturas elevadas, la corrosión puede ocurrir por la reacción directa del gas sin la presencia de un electrólito líquido. La velocidad de ataque se incrementa sustancialmente con la temperatura, aumentando la película superficial como resultado de la reacción entre óxido y metal. (1) Las aleaciones a alta temperatura, tienden a formar con el oxígeno del medio en el que se encuentran, capas de óxidos resistentes al ataque de compuestos azufrados, al ataque por cenizas, sales y compuestos halógenos. Además, algunas capas de óxido son continuas, homogéneas e impermeables a la difusión del carbono y del

nitrógeno, evitando los problemas de carburación y nitruración. La oxidación, es la reacción superficial y de difusión más influyente a alta temperatura, lo cual, se debe considerar seriamente si se tiene en cuenta que la mayor parte de los ambientes industriales tienen suficiente actividad de oxígeno para permitir la oxidación formando parte de la corrosión a alta temperatura, independientemente del modo predominante de corrosión. (2) Sin embargo, aunque las aleaciones en estos ambientes son oxidadas se pueden inducir a que esta, sea uniforme o a nivel intergranular. La velocidad de oxidación, se puede decir, que es función de la temperatura y composición química del acero y conlleva un proceso el cual se puede resumir en etapas, que inician con la adsorción del oxígeno por el metal; la reacción química que forma la capa de óxido, la nucleación y crecimiento del óxido, además de la difusión del oxígeno, al interior del metal iniciando la oxidación interna; siendo la difusión, el flujo microscópico de materia, que va de la zona de mayor concentración hacia la de menor concentración. Luego, surge la formación de una capa de óxido uniforme que podría proteger el metal y posterior creación de una capa no protectora debido a su espesor, evidenciando defectos como microgrietas, cavidades y porosidades. Por último, aparecen las macrogrietas en la capa de óxido. (10) (11) (12) (15)

### 3.3.2. Corrosión en sistemas expuestos a temperaturas elevadas

Las calderas siendo el ejemplo más claro a nivel industrial, están expuestas a problemas de corrosión a altas temperaturas, motivo por el cual, es importante conocer el comportamiento de los materiales en ellas para prevenir el fenómeno. De ahí, la importancia de un adecuado tratamiento, mantenimiento y operación de la misma. Dentro del ámbito de generación de energía, los problemas de corrosión afectan la actividad en gran porcentaje teniéndose en cuenta que de la caldera depende un 60% la operación. (3) Durante el funcionamiento de una caldera, las partículas químicas que mayores problemas presentan son el oxígeno y el CO<sub>2</sub>, que generan problemas de corrosión, la dureza cálcica y magnésica que ocasiona problemas de recalentamiento y posterior rotura de los tubos de caldera y el sílice, que causa problemas de incrustaciones, arrastre con el vapor y posterior depositación en los alabes de las turbinas destruyendo el sistema. (12) (15)

### 3.3.3. Acero ASTM A53 GRADO B

ASTM A53, es la especificación o designación estándar para tubos de acero de alta presión, fabricados con acero al carbono de calidad estructural. Son utilizados para la conducción de fluidos a grandes presiones como agua, gas, vapor, petróleo, aire y fluidos no corrosivos (4).

C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0.3	1.2	0.05	0.045	0.4	0.4	0.4	0.15	0.08

Tabla 1. Composición química principal de los aceros ASTM A53

La composición química en los materiales y los porcentajes de los elementos contenidos en ellos, brindan características y propiedades muy variadas, algunas de las cualidades que aporta cada elemento químico son las siguientes:

Carbono (C): Endurece el acero y la resistencia a la tracción en la condición laminada o normalizada. Los aceros al carbono y al carbono-molibdeno son los más utilizados para trabajos a altas temperaturas y para construcción de calderas.

Manganeso (Mn) y Níquel (Ni): Mejora las condiciones de termofluencia, pero disminuye la resistencia última a la tracción durante largos periodos debido a la retención de austenita.

Fósforo (P) y Azufre (S): A altas temperaturas, reducen la ductilidad del acero, disminuyendo la resistencia a la fatiga y a la ruptura.

Cromo (Cr): En pequeñas cantidades (más de 0.5%), es un estabilizador y formador de carburos, disminuye la grafitización y evita la esferoidización. En cantidades de más de 9% incrementa la resistencia del acero a la oxidación.

Molibdeno (Mo): Aumenta la resistencia a la tracción a altas temperaturas, tiene gran efecto sobre la templabilidad del material.

Vanadio (V): En algunos aceros de alto carbono, ofrece una resistencia adicional al temple.  
(TODO (12))

Grado	Resistencia a la Tracción (Mpa)	Punto de Fluencia (Mpa)
A	330	205
B	415	240

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A53

### 3.3.4. Prueba de oxidación cíclica

Se realiza una prueba de oxidación cíclica, en la que se estudian 15 probetas en forma de cubo de alrededor de  $1\text{ cm}^3$  de volumen, que se obtuvieron de un tubo de acero ASTM A213 T22. Dos de las caras del cubo de cada probeta se preparan metalográficamente con lijas N° 80, 100, 220, 400 y 600, luego se almacenaron en silica gel para evitar su oxidación en un ambiente húmedo. Antes de exponer las probetas a las altas temperaturas, se registra el peso de cada una con precisión de 0,0001g y se procede a ubicarlas en la canastilla de tal forma que su identificación durante todo el proceso esté asegurada. Finalmente, se someten a un ambiente oxidante como lo son las altas temperaturas en un horno, simulando las condiciones de trabajo de una caldera. Este ensayo, se realiza a temperatura constante de  $600^{\circ}\text{C}$  y esta guiado por un protocolo de trabajo interno de la investigación. La prueba consta de 200 horas continuas de trabajo, en los que cada probeta se expuso una cantidad de tiempo de exposición determinada. Las probetas pasaran 10 minutos fuera del horno y 50 minutos dentro de él siendo 1 hora equivalente a 1 ciclo de trabajo. Se determina inicialmente, que en los ciclos de trabajo 5, 10, 25, 50, 100, 150 y 200, se retiran todas las probetas del horno y se registra su peso. Luego, para continuar con el ensayo se ingresan al horno nuevamente pero se retiran dos probetas cada vez para analizarlas más adelante. Así, sucesivamente hasta concluir los 200 ciclos en los que adentro del horno solo quedan tres probetas para su estudio. Ya con la prueba terminada, se procede a realizar un análisis de la oxidación en cada probeta mediante la técnica de medición de microscopía electrónica de barrido (SEM) de la siguiente manera:

Se preparan metalográficamente de nuevo 7 de las 15 probetas, con lijas N° 80, 100, 220, 400, 600, 1000 y 1200, para llevarlas a brillo espejo y facilitar el uso del microscopio mencionado, lo que permitirá observar la sección transversal de las mismas y determinar el espesor del óxido formado y sus características. Cada probeta, está plenamente identificada, y se analizará una

probeta por cada cantidad de ciclos estipulada al iniciar el ensayo, es decir, una probeta es de los 5 ciclos, otra de los 10 ciclos, 25 ciclos, 50 ciclos, 100 ciclos, 150 ciclos y 200 ciclos, y de esta manera notar el incremento en las capas de óxido. Las 8 probetas restantes permanecen en las mismas condiciones de cuando fueron retiradas del horno, y serán observadas por el microscopio electrónico de barrido en esta forma, para registrar la mayor cantidad de información posible acerca de estas. Además, se anexa al estudio, un análisis estadístico del incremento de peso de las probetas a lo largo de la prueba.

### 3.3.5. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido SEM, por sus siglas en inglés (*Scanning Electron Microscope*), es un elemento que permite desarrollar una técnica de microscopia electrónica capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra, utilizando las interacciones electrón-materia a través de un haz de electrones. El método consiste en un barrido de la superficie de la muestra a analizar, con electrones acelerados que viajan a través del cañón, hasta golpear la sección observada. Un detector formado por lentes, mide la cantidad e intensidad de los electrones que devuelve la probeta, siendo capaz de producir imágenes de alta resolución, de forma que las características de la muestra pueden ser examinadas con gran amplificación y detalle, y así identificar los componentes en el área analizada. Permite estudiar la morfología de la corrosión, composición de capas formadas y fases presentes, en las muestras del ensayo, siendo posible evaluar desde pequeñas secciones de capa adherida sobre la superficie metálica, como porciones de capa que se desprenden de la misma. (12)

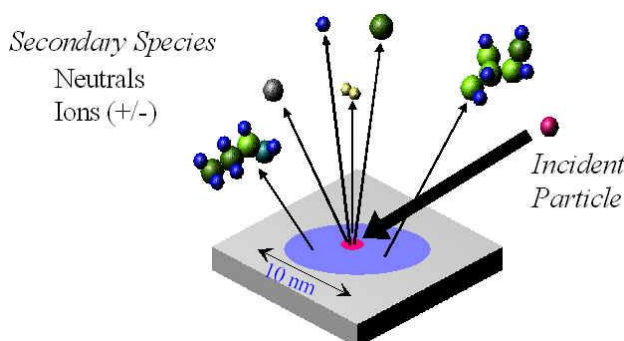


Figura 27. Principio de funcionamiento del SEM

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Antes de presentar la información obtenida en la prueba de oxidación cíclica con sus respectivos análisis, se muestran los resultados y análisis, del comportamiento mostrado por el mecanismo construido en la realización del ensayo de oxidación cíclica.

### 4.1. RESULTADO FINAL DEL ENSAMBLE

El mecanismo construido, realiza una prueba de oxidación cíclica por un tiempo de 200 horas continuas de trabajo. Gracias al ensayo realizado, se hace una evaluación general del equipo en la que se determina que el mecanismo diseñado y ensamblado, cumple con los requerimientos establecidos al inicio del proyecto. Se evidencia además, que la selección de materiales fue la adecuada para la tarea, teniendo en cuenta factores de seguridad en estos, garantizando que los elementos soporten pruebas de larga duración. Por esto, no fue necesario realizar una parada de descanso, retrasando el cronograma planificado. Los sistemas neumático, mecánico y eléctrico, funcionaron eficientemente mostrando que su acople fue bien realizado, cumpliendo los objetivos del proyecto y para comprobarlo se muestra a continuación un comparativo entre la idea inicial de diseño y la materialización de la misma.

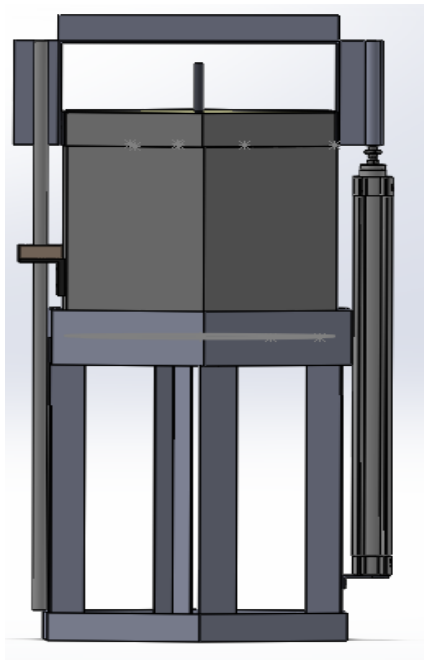


Figura 28. Comparativo entre el diseño inicial y el mecanismo finalmente construido

#### 4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA DE OXIDACIÓN CÍCLICA

La prueba se realizó con éxito, con 15 probetas de acero ASTM A53 GRADO B ensayadas cíclicamente durante 200 horas a 600° Celsius. El tiempo de exposición de cada probeta aumentó gradualmente, sin embargo, cada cierta cantidad de ciclos cumplidos se retiraban dos probetas para su posterior estudio, obteniendo muestras que permitieran observar el comportamiento del material en un tiempo establecido. Lo anterior se registra en la siguiente tabla, siendo las probetas número 15 y 14 las primeras en retirarse a los 5 ciclos, así sucesivamente como lo muestra la tabla 3. El comportamiento mostrado por el material, en cuanto a ganancia de masa, respecto al tiempo de exposición se analiza estadísticamente y se muestra a continuación:

PROBETA	PESO INICIAL	PESO A LOS 5 CICLOS	PESO A LAS 10 CICLOS	PESO A LOS 25 CICLOS	PESO A LOS 50 CICLOS	PESO A LOS 100 CICLOS	PESO A LOS 150 CICLOS	PESO A LOS 200 CICLOS
1	3,406	3,4175	3,4182	3,4199	3,4248	3,4383	3,4481	3,3897
2	3,3333	3,3449	3,3465	3,353	3,3573	3,3683	3,3778	3,3091
3	3,362	3,3737	3,3759	3,3832	3,3888	3,3895	3,3957	3,3342
4	3,193	3,2036	3,2046	3,2075	3,2224	3,2474	3,2543	
5	3,0429	3,0517	3,0527	3,0686	3,0821	3,0953	3,1411	
6	3,1494	3,1698	3,176	3,1996	3,2141	3,2515		
7	3,1236	3,1437	3,1508	3,1689	3,1805	3,2029		
8	3,0025	3,0194	3,026	3,0402	3,0676			
9	2,7732	2,7909	2,7974	2,8081	2,827			
10	3,1454	3,1637	3,1711	3,1951				
11	3,1487	3,1653	3,1731	3,194				
12	2,854	2,8701	2,8766					
13	3,2828	3,3019	3,3088					
14	3,153	3,1721						
15	3,0673	3,0847						

Tabla 3. Ruta de trabajo y registro del peso de las probetas

En el proceso de oxidación cíclica, la ganancia de peso incrementa con el aumento del tiempo de exposición del material, frente a una temperatura elevada. Para la temperatura manejada de 600° Celsius, se puede observar que en las primeras horas de exposición se presenta una velocidad de crecimiento parabólico y para tiempos mayores a 20 ciclos la velocidad de crecimiento tiende a un comportamiento lineal (comportamiento para-lineal), cambiando de una teoría de incremento de masa en el tiempo, a otra (10,12,13).

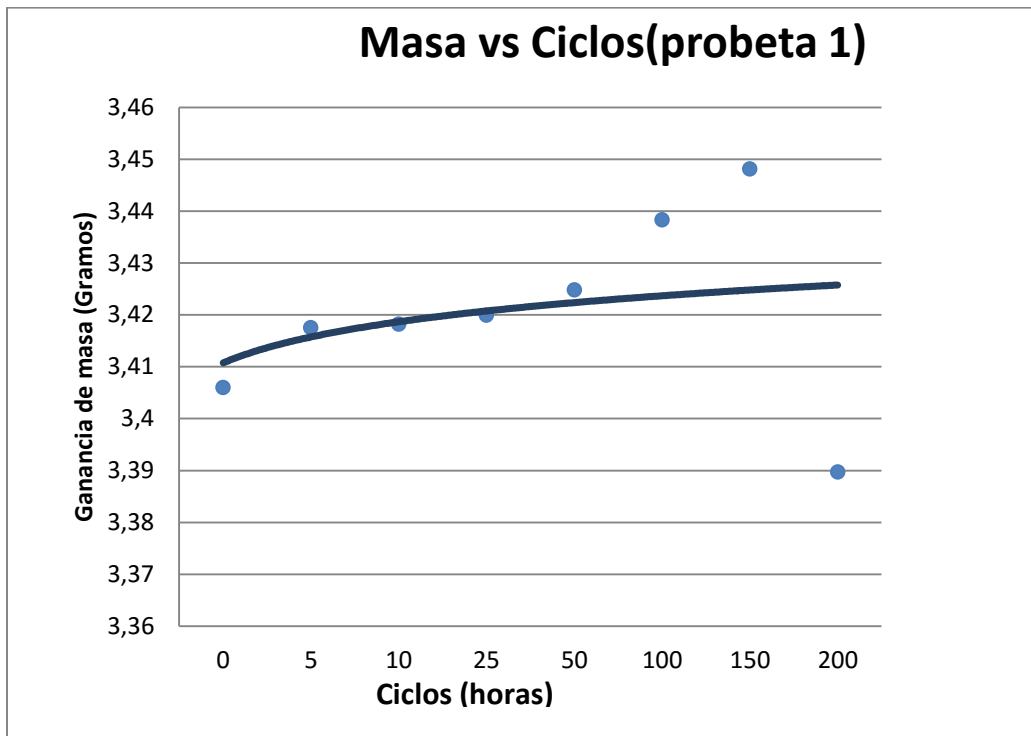


Figura 29. Comportamiento en la prueba de oxidación cíclica de la probeta 1

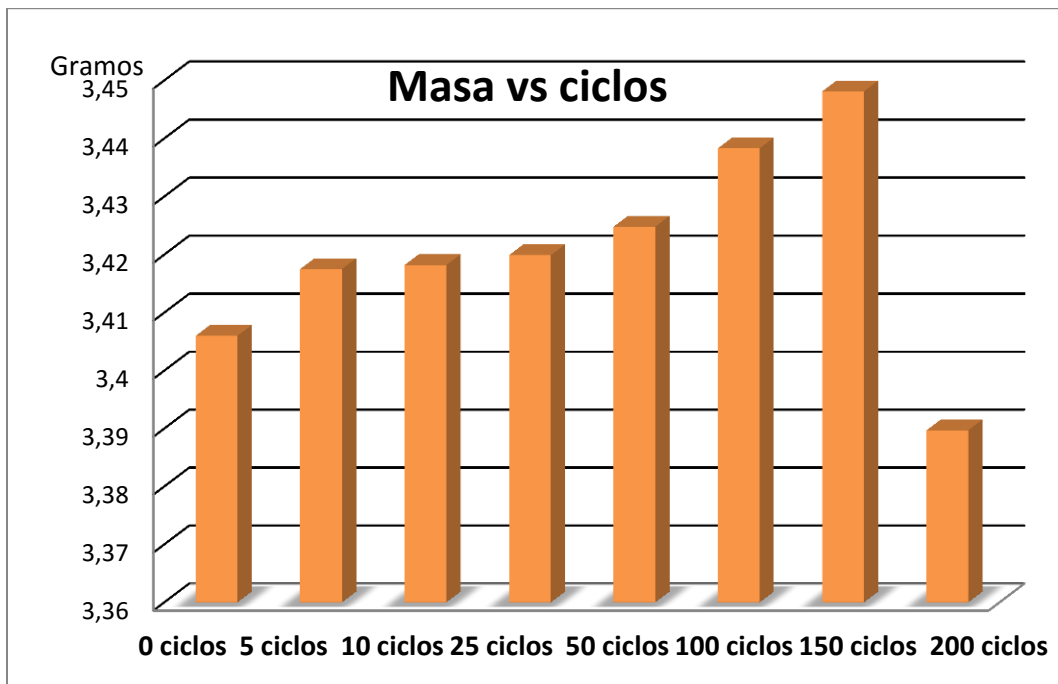


Figura A. Comportamiento de la masa de la probeta 15



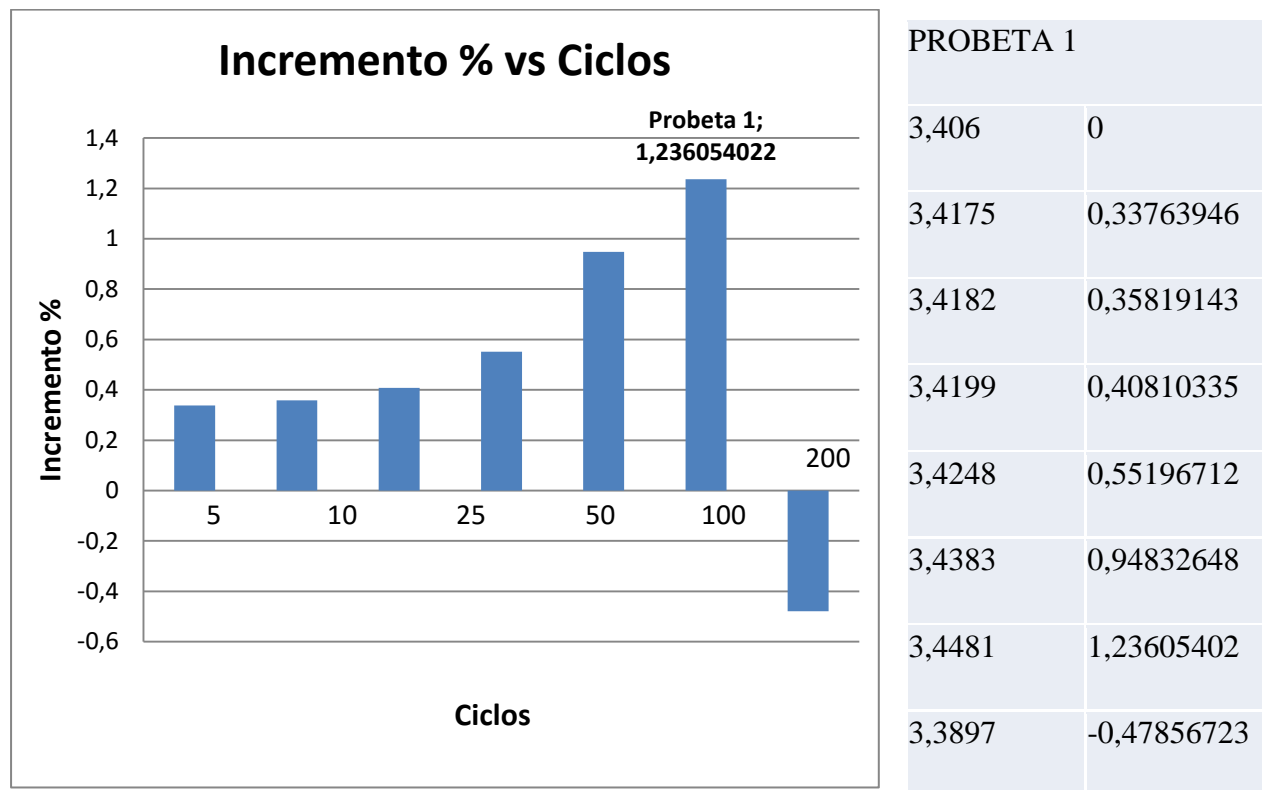


Figura B. Comportamiento porcentual de la masa de la probeta 15

Figura 30. Comportamiento de la probeta 15 de acero ASTM A53 GRADO B con una temperatura de 600°C con un tiempo de exposición de 5 horas

De la figura 30 se puede definir que para un tiempo de exposición de 0 a 50 ciclos, la ganancia de peso fue mínima con valores muy cercanos. Para el máximo tiempo de exposición de 200 horas se observa un incremento sustancial en la ganancia de peso. Los mayores valores de ganancia de peso a una temperatura de 600° Celsius se obtuvieron para tiempos de exposición entre 50 y 200 horas obedeciendo a una mayor activación de la difusión en estado sólido de los iones de hierro del metal base hacia la capa nueva del metal formado, aumentando el espesor de la capa de óxido de cada una de las probetas(15).

#### 4.3. ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO SEM

La microscopía electrónica de barrido SEM, se realizó para determinar la morfología y composición química aproximada de las capas presentes en el sistema metal –óxido. Este análisis se le realizó a las probetas expuestas a 600° Celsius durante 5, 10, 25, 50, 100, 150 y 200 horas en los establecimientos de tecno-academia del SENA.

##### 4.3.1. Análisis de microscopía electrónica de barrido SEM a la probeta 15

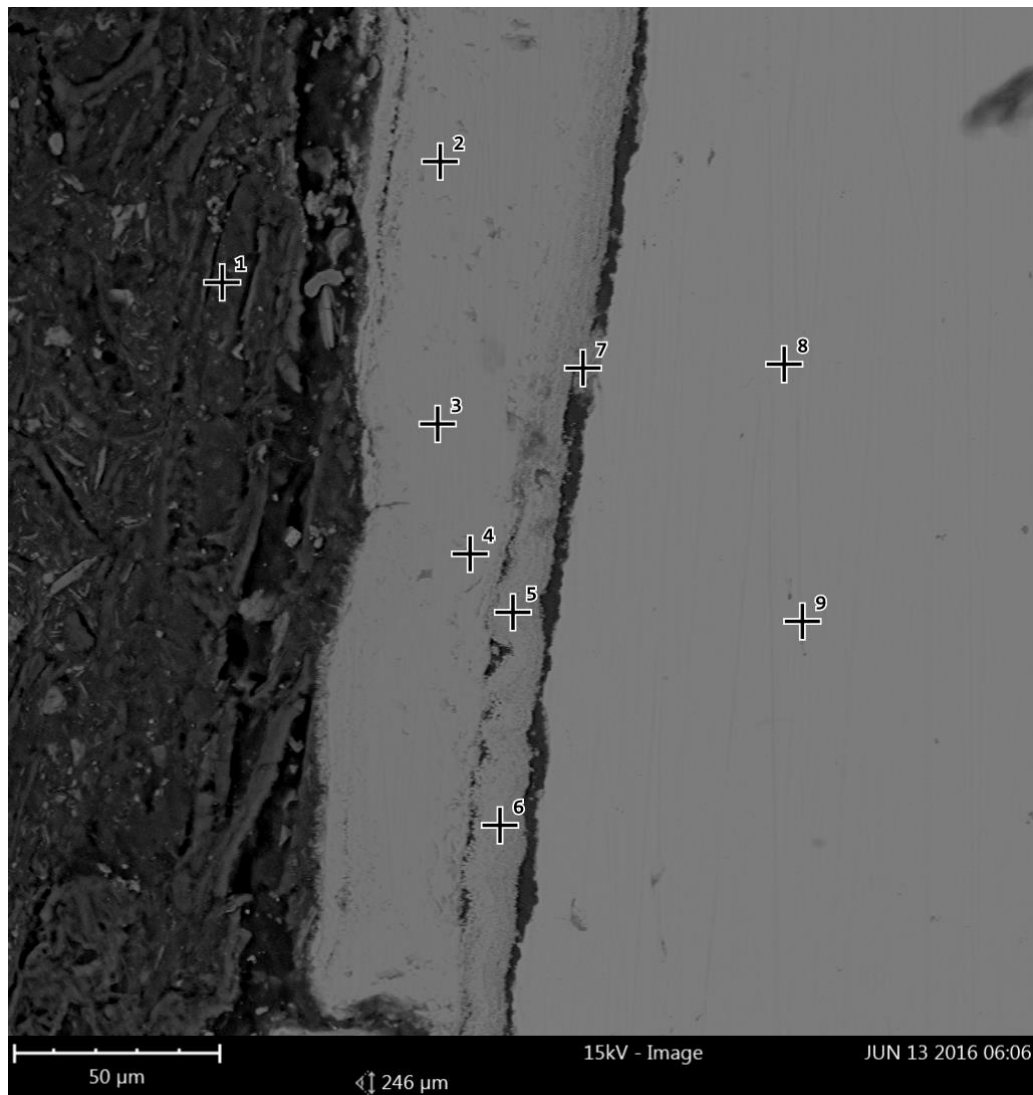


Figura 31. Probeta 15 tiempos de exposición 5 horas a una temperatura de 600 °C

Como se puede observar en la imagen SEM, la superficie de la probeta 15 muestra presencia de óxidos, para los cuales, la capa es irregular con poros en la capa externa. Con los barridos SEM, lo que se quiere observar es el espesor de la capa de óxido que se genera por su exposición al ambiente mencionado previamente, así como también la composición química del mismo, cada uno de los puntos marcados en la imagen se consideran relevantes para el análisis, ya que suministran información importante. A continuación, se presenta los puntos analizados en cada probeta con sus respectivas composiciones químicas.

Probeta 15 Tiempo de exposición 5 horas a 600°C.

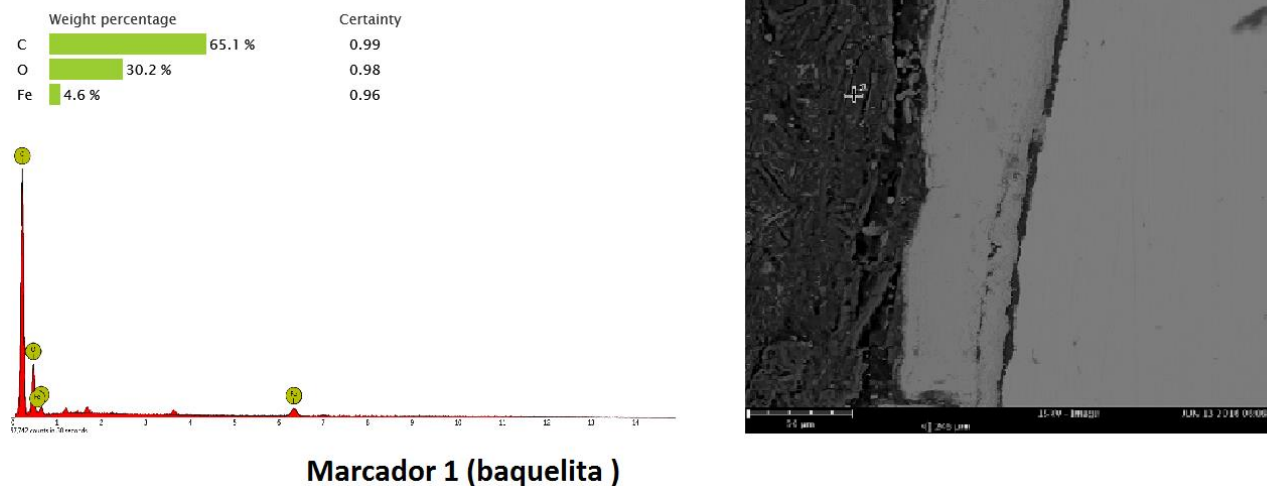


Figura 32. Punto de análisis 1 en la probeta 15

.Marcador 1: Este punto, por las composiciones químicas registradas, hace referencia a la baquelita que es el material donde se encapsularon las probetas para tener facilidad al momento de la preparación metalográfica. Esta afirmación se hace ya que la composición química obtenida muestra que el hierro se encuentra en proporciones muy bajas y por consiguiente no puede tratarse del sustrato base.

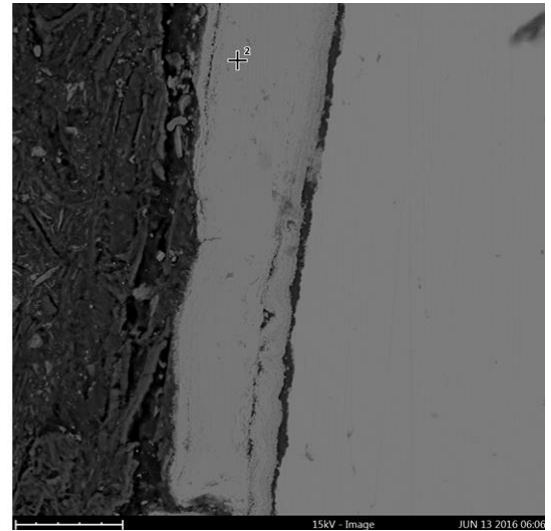
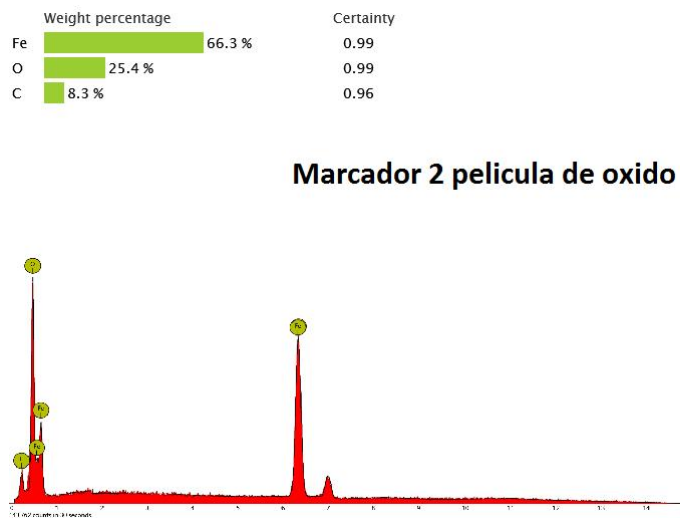


Figura 33. Punto de análisis 2 en la probeta 15

Marcador 2: Como se observa en la imagen SEM en este punto y por las composiciones químicas, se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia a la película de óxido formada en el transcurso de la prueba donde hay presencia de oxígeno en el ambiente, además de estar en exposición directa a una temperatura de 600°C.

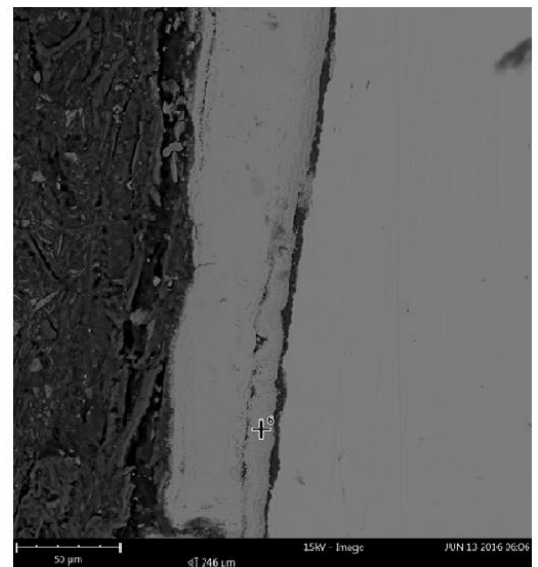
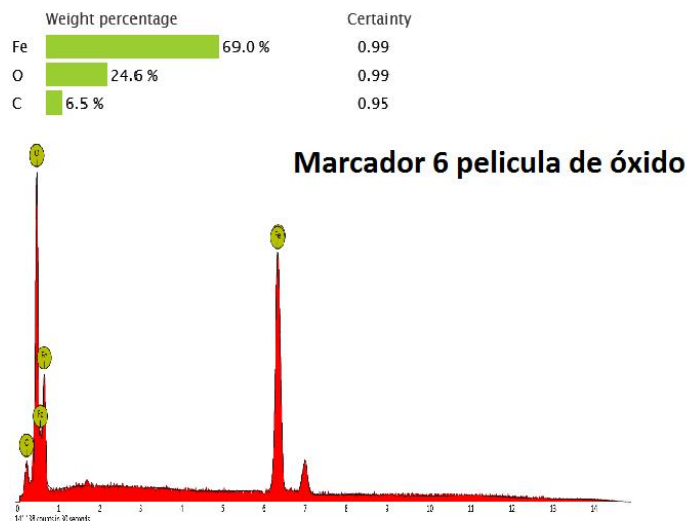


Figura 34. Punto de análisis 6 en la probeta 15

Marcador 6: Como se observa en la imagen SEM en este punto y por las composiciones químicas se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia a la película de óxido formada

por los ciclos de la prueba donde hay presencia de oxígeno en el ambiente además de estar en una exposición directa a una temperatura de 600°C el resultado obtenido es muy similar al del marcador 1 ya que se encuentra en la misma zona o franja de la película del óxido.

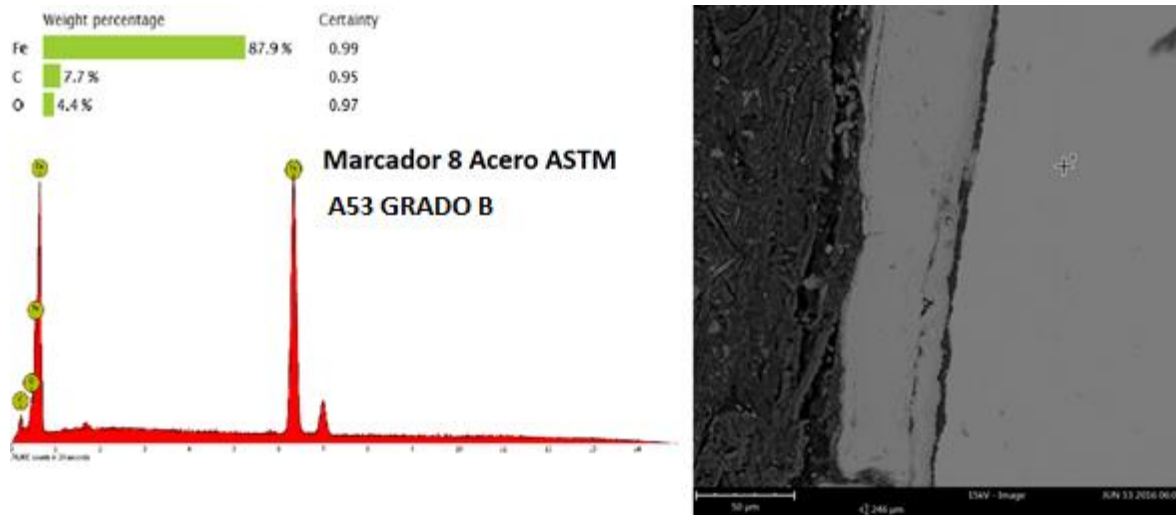


Figura 35. Punto de análisis 8 en la probeta 15

Marcador 8: Como se observa en la imagen SEM este punto y por las composiciones químicas se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia a sustrato de la probeta es decir estas composiciones pertenecen al acero ASTM A53 GRADO B, como se observa el marcador 8 ya está fuera de la franja de la película de óxido y esta zona además paso por un proceso de lijado donde se removió la capa de óxido que tenía.

#### 4.3.2. Análisis de microscopía electrónica de barrido SEM a la probeta 13

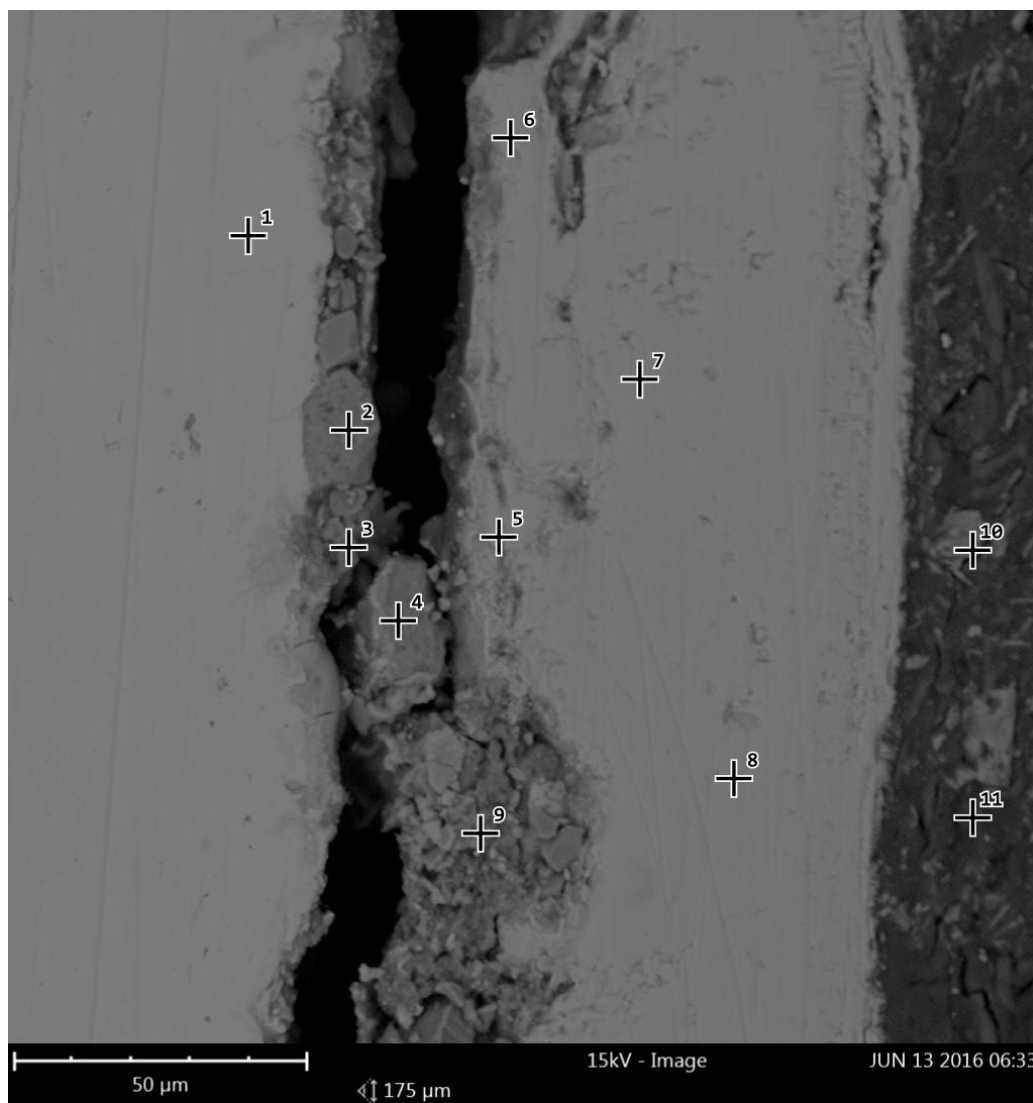


Figura 36. Probeta 13 tiempos de exposición 10 horas a una temperatura de 600° C

Como se puede observar en la imagen SEM, la superficie de la probeta 13 presenta más capas de óxido y un mayor espesor en ellas, debido a que el tiempo de exposición es más extenso. Además, se observa un mapeo con defectos como poros en la capa externa, a continuación se explica cada marcador de la probeta 13.

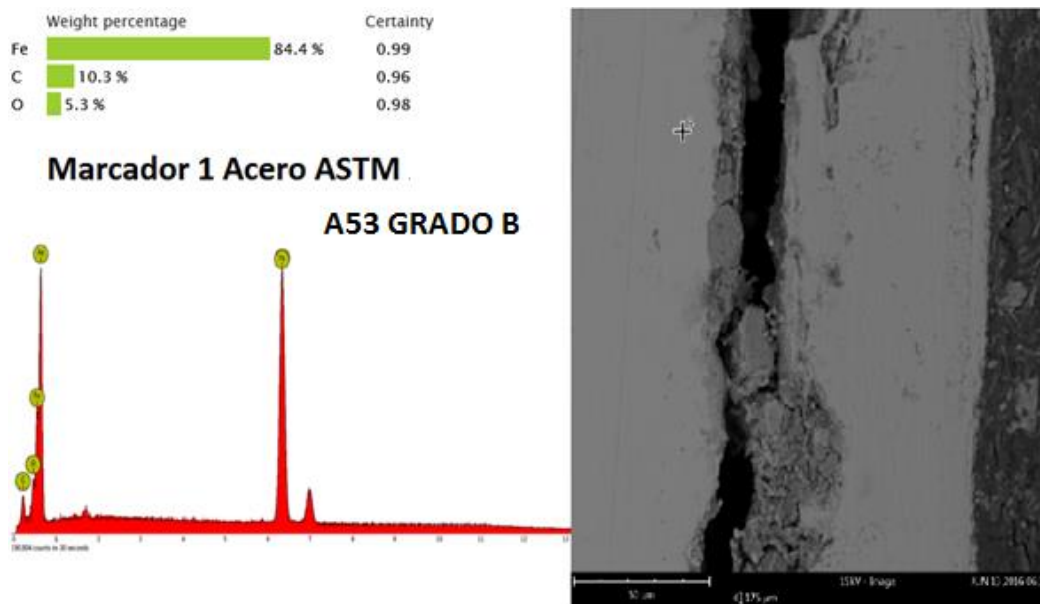


Figura 37. Punto de análisis 1 en la probeta 13

Marcador 1: Como se observa en la imagen SEM este punto y por las composiciones químicas se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia al sustrato de la probeta, es decir, estas composiciones pertenecen al acero ASTM A53 GRADO B.

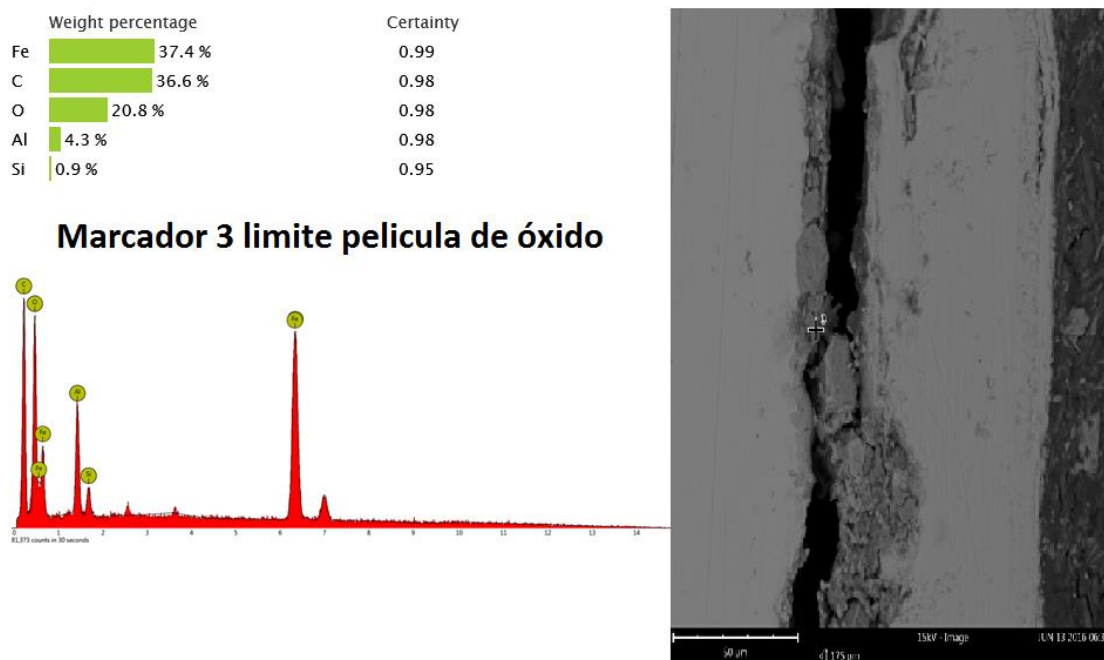


Figura 38. Punto de análisis 3 en la probeta 13

Marcador 3: En las composiciones químicas registradas por el equipo no hay claridad ya que la ubicación del punto de análisis está en una fisura o desnivel del material. Se muestra gran cantidad de materiales que no están presentes en el acero estudiado.

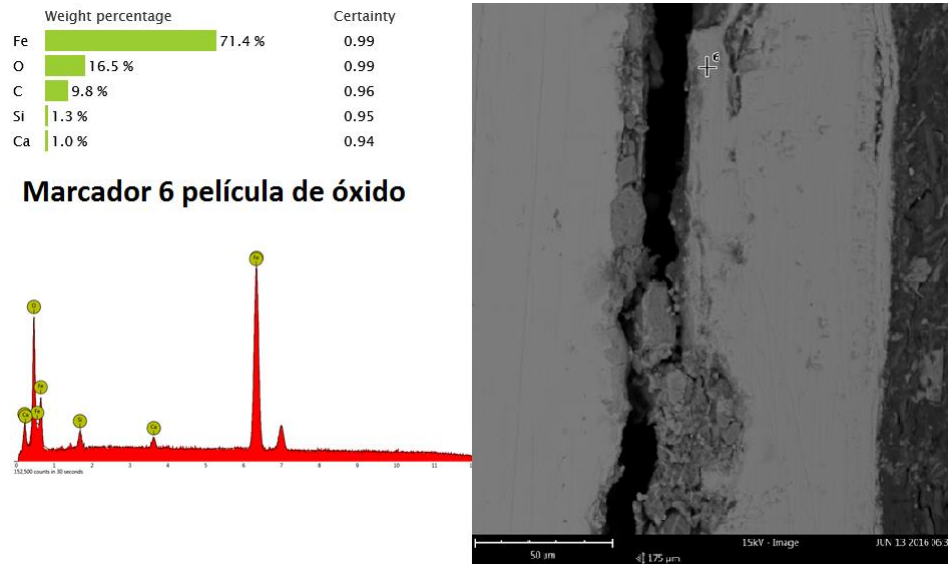


Figura 39. Punto de análisis 6 en la probeta 13

Marcador 6: Este punto hace referencia a la capa de óxido formada, además aparecen componentes como el Silicio y Calcio, diferentes a los que se observaba en los demás marcadores, debido a la dificultad de analizar la zona de la fisura o desnivel de la probeta.

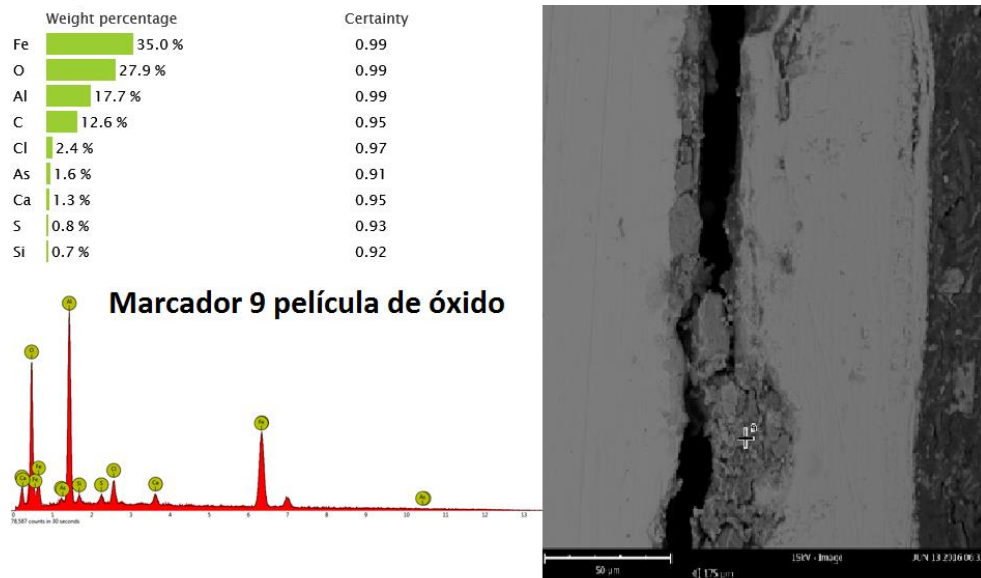


Figura 40. Punto de análisis 9 en la probeta 13



Marcador 9: Como se observa en la imagen SEM en este punto y por las composiciones químicas se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia a la película de óxido formada por los ciclos. Se pueden observar los diferentes componentes químicos pero en proporciones bajas, ya que la superficie no se puede analizar con claridad por el desnivel en el material.

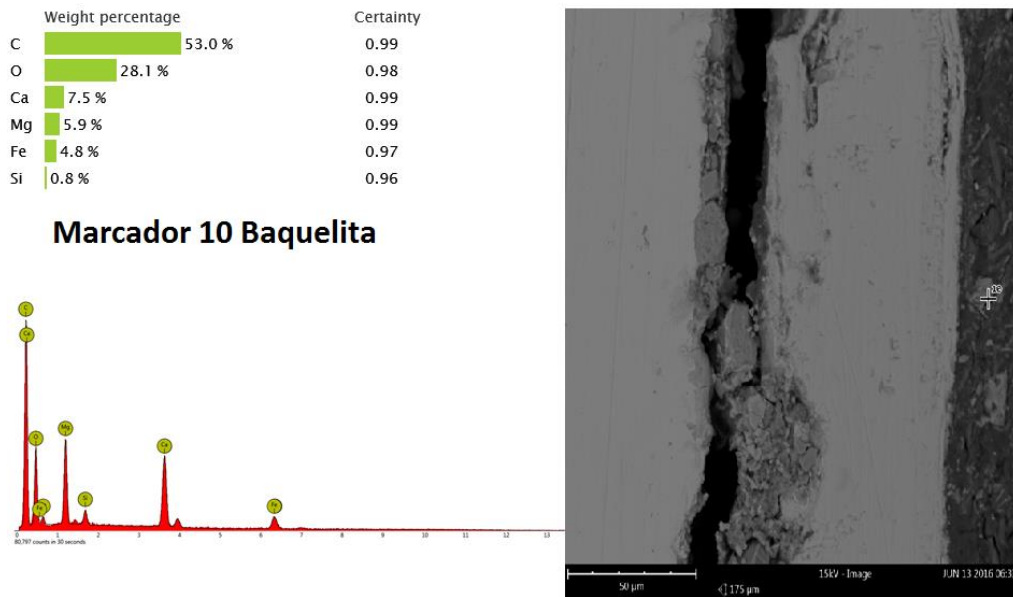


Figura 41. Punto de análisis 10 en la probeta 13

Marcador 10: Como se observa en la imagen SEM en este punto y por las composiciones químicas se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia a la baquelita que es el material donde se puso las probetas para facilitar la preparación metalográfica. Se reconoce fácilmente ya que el porcentaje de hierro es muy bajo respecto a la proporción que debe tener el acero ASTM A53 GRADO B.

#### 4.3.3. Análisis de microscopía electrónica de barrido SEM a la probeta 11

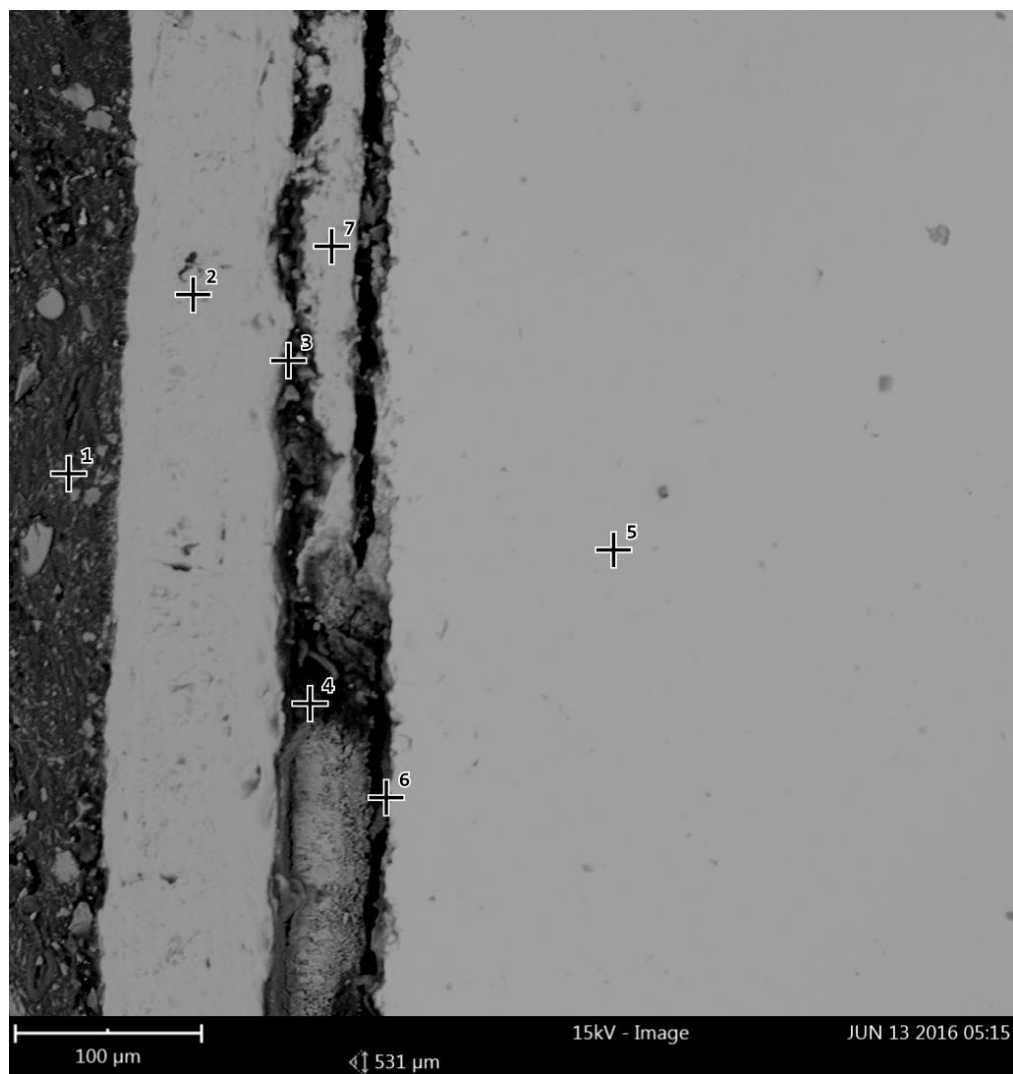


Figura 42. Probeta 11 tiempos de exposición 25 horas a una temperatura de 600° C

Como se puede observar en la imagen SEM, la superficie de la probeta 11 presenta más capas de óxido que las probetas 15 y 13, debido a que el tiempo de exposición es mayor. Lo anterior es notorio, al comparar las escalas en las imágenes; el espesor de la capa de óxido es de aproximadamente 100 μm y las capas anteriores de 50 μm. A continuación se ve cada marcador de la probeta 11.

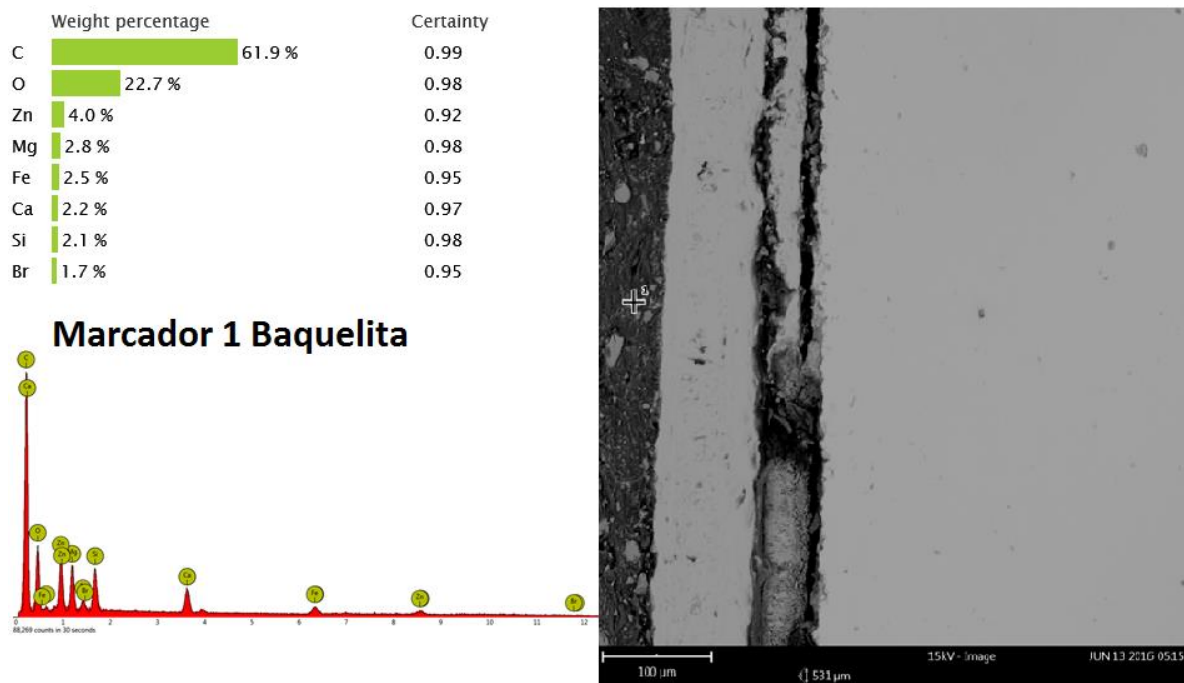


Figura 43. Punto de análisis 1 en la probeta 11

Marcador 1: El marcador seleccionado hace referencia a la baquelita. Se reconoce fácilmente ya que el porcentaje de hierro es muy bajo comparado con la proporción que debe tener el acero ASTM A53 GRADO B.

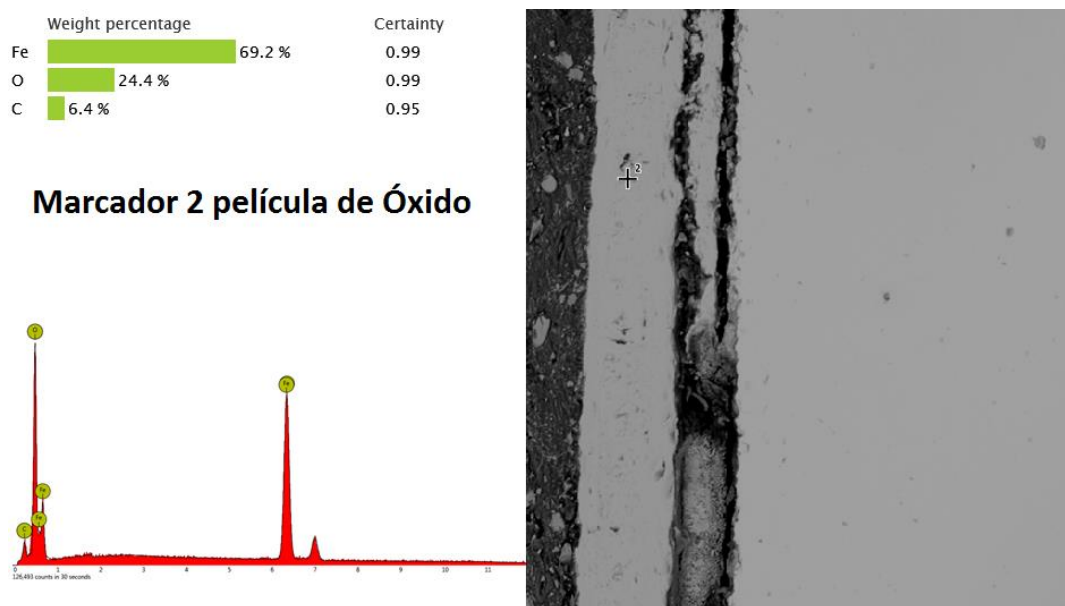


Figura 44. Punto de análisis 2 en la probeta 11

Marcador 2: Por las composiciones químicas, se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia a la película de óxido formada, mostrado en la proporción de hierro, por encima del 65% y del oxígeno 24% aproximadamente. También se puede comparar el tamaño de la película de óxido con el de probetas expuestas menos tiempo, evidenciando que el espesor depende del número de ciclos a que este expuesta cada probeta.

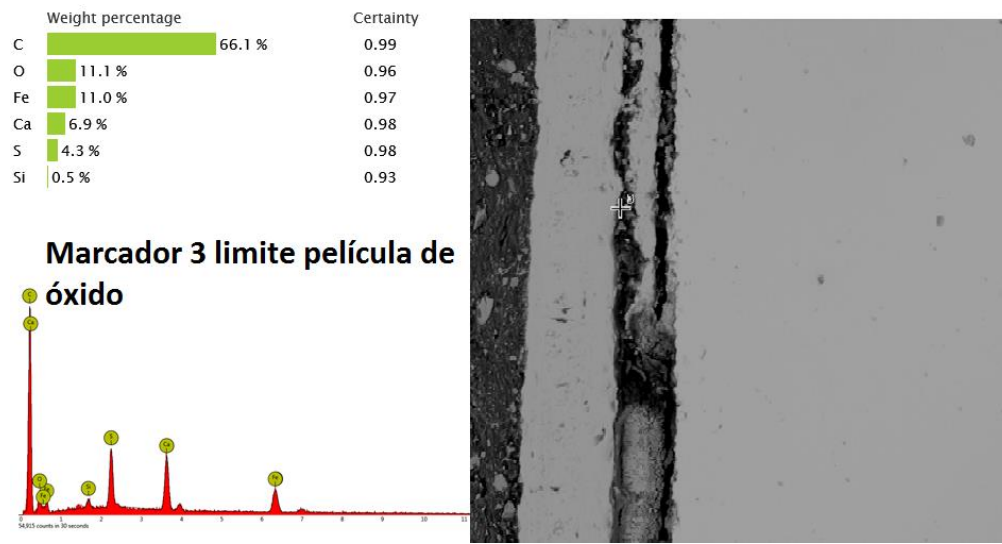


Figura 45. Punto de análisis 3 en la probeta 11

Marcador 3: No hay claridad en los materiales registrados, ya que la zona analizada es de difícil acceso. Arrojando lecturas erróneas de la composición química del sector.

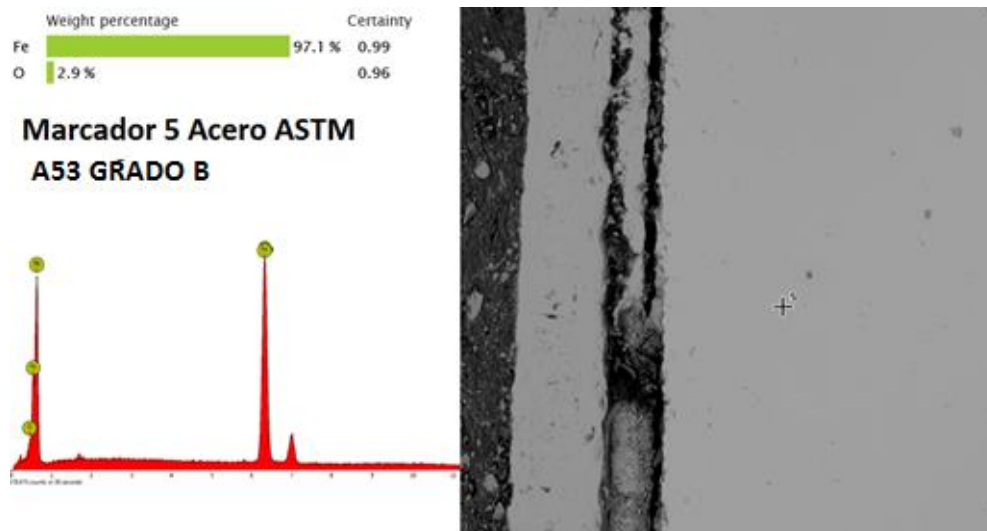


Figura 46. Punto de análisis 5 en la probeta 11

Marcador 5: En las composiciones químicas se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia al sustrato de la probeta, es decir, al acero ASTM A53 GRADO B. Como se observa, el punto está fuera de la capa de óxido.

#### 4.3.4. Análisis de microscopía electrónica de barrido SEM a la probeta 9

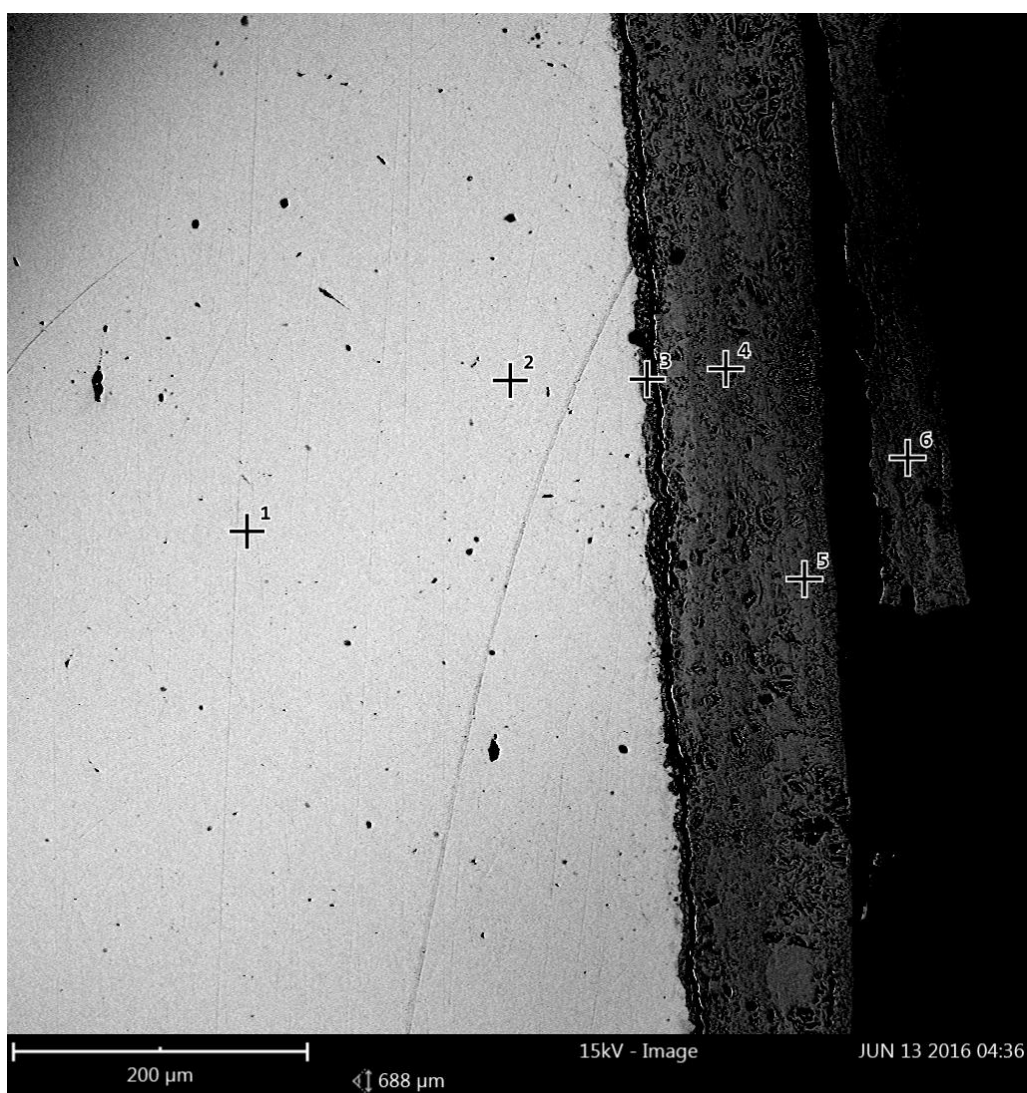


Figura 47. Probeta 9 tiempos de exposición 50 horas a una temperatura de 600° C

Como se puede observar en la imagen SEM, la superficie de la probeta 9 presenta más espesor en las capas de óxido que las probetas 15, 13 y 11. Esto, debido a que el tiempo de exposición es mayor, obligando el equipo a generar un aumento en la escala para poder observar el fenómeno. A continuación se explica cada marcador de la probeta 9 con los puntos más relevantes.

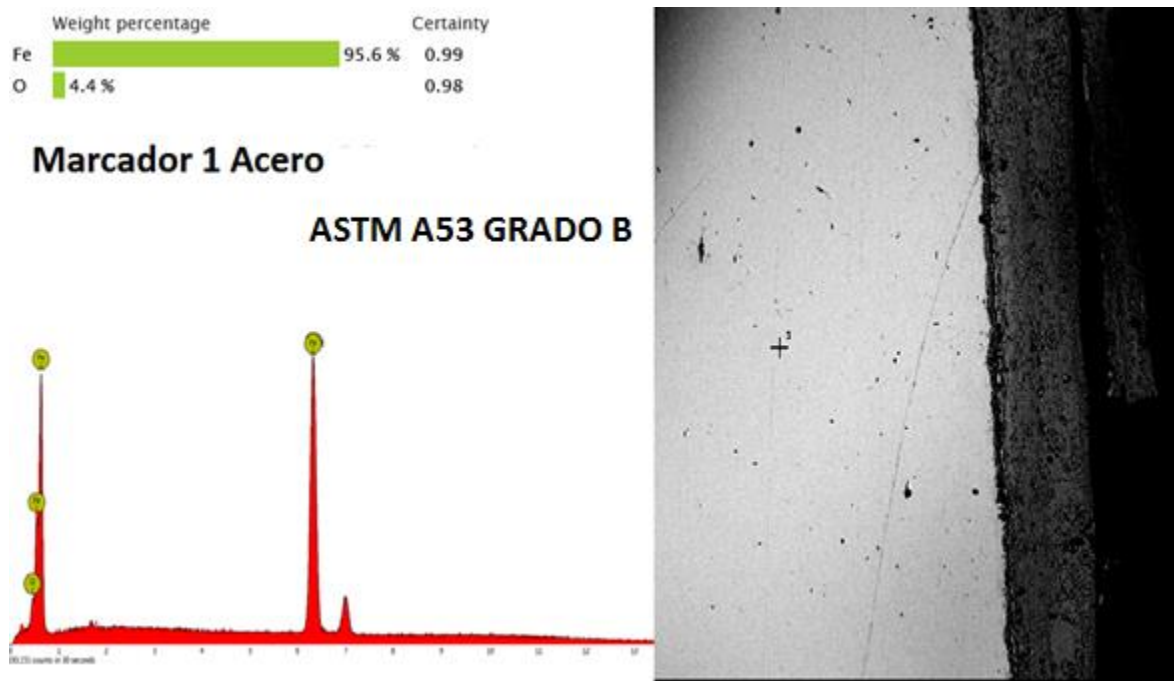


Figura 48. Punto de análisis 1 en la probeta 9

Marcador 1: Como se observa en la imagen SEM, en este punto y por las composiciones químicas, se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia al sustrato de la probeta, es decir, al acero ASTM A53 GRADO B.

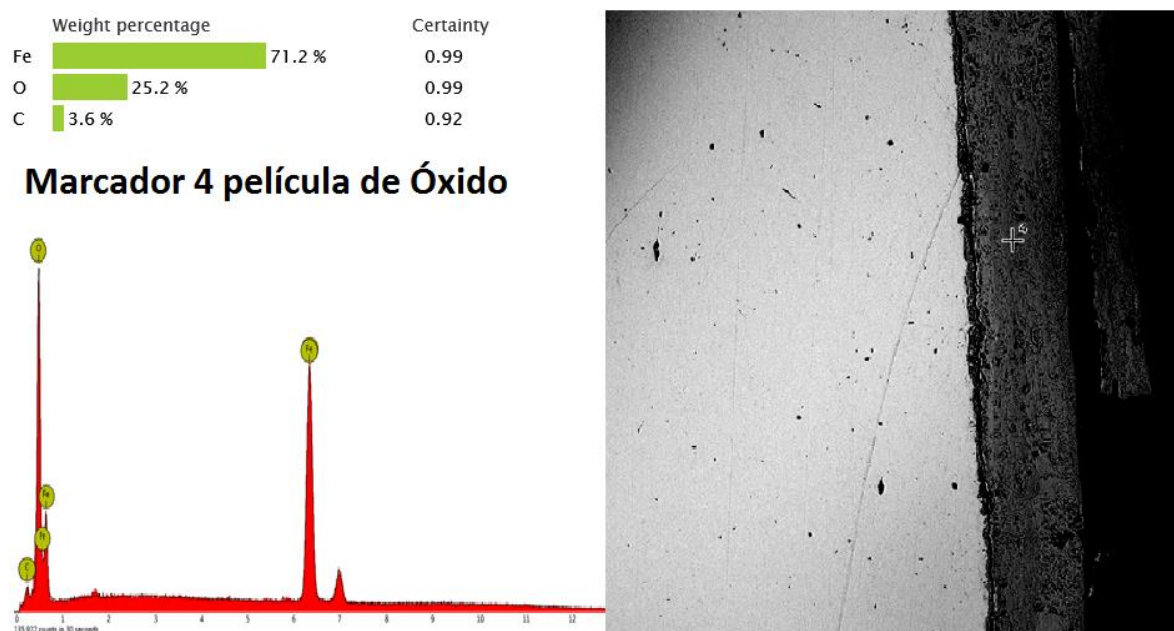


Figura 49. Punto de análisis 4 en la probeta 9



Marcador 4: Como se observa en la imagen SEM, en este punto y por las composiciones químicas se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia a la película de óxido formada por los ciclos, ya que la proporción de hierro está por encima del 70% y el del oxígeno está en un 25 % aproximadamente. En esta imagen también se puede comparar el tamaño de la película de óxido ya que en esta se ve una escala mayor que en probetas con tiempo de exposición inferior. Se nota que el espesor depende del número de ciclos transcurridos y que el óxido cada vez se presenta en mayor porcentaje.

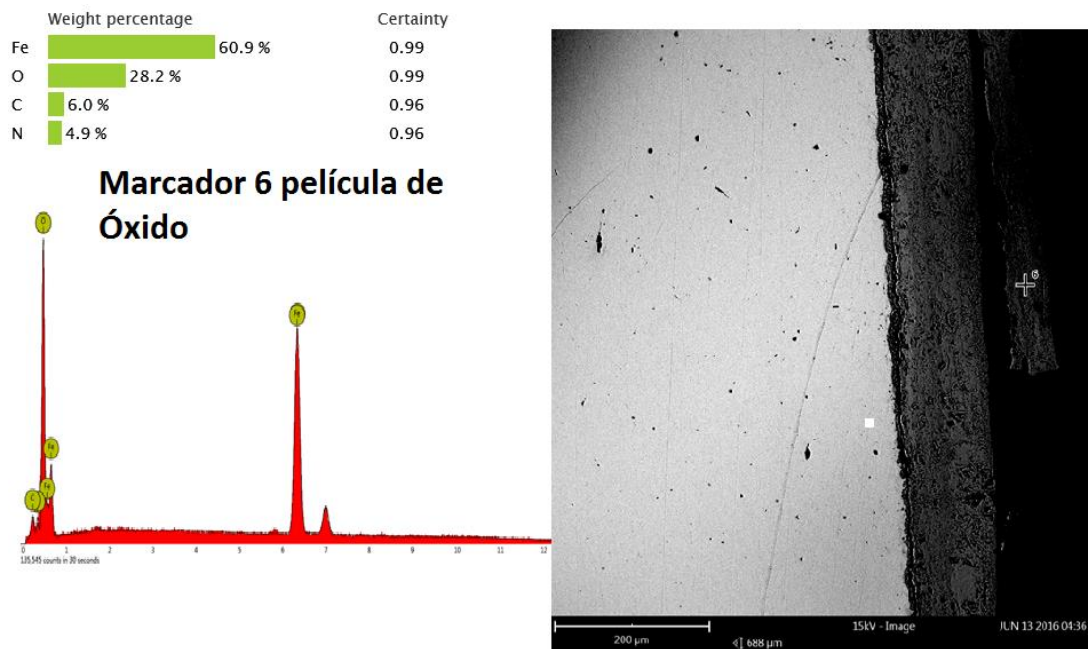


Figura 50. Punto de análisis 6 en la probeta 9

Marcador 6: Como se observa en la imagen SEM, en este punto y por las composiciones químicas se puede apreciar que el marcador seleccionado hace referencia a la película de óxido formada por los ciclos, en donde la proporción de hierro es superior al 60% y el oxígeno está presente en un 25% aproximadamente. Además, se puede apreciar que el espesor del óxido en esta probeta es casi el doble que el espesor del óxido de la probeta 15, comprobando la teoría del aumento de este, a medida que transcurre el tiempo de exposición a altas temperaturas de las probetas.

#### 4.4. RESULTADOS GENERALES

- Se logra materializar la idea contemplada en el diseño, sin sufrir cambios significativos en él.
- El mecanismo cumplió con las necesidades que se tenía, presentando así una prueba experimental de 200 horas.
- El comportamiento de la prueba fue satisfactoria ya que el mecanismo no paro su trabajo, este fue de forma continua.
- Los objetivos en la prueba de oxidación cíclica fueron buenos ya que cumplió con las teorías contempladas respecto al ensayo, creando una capa de óxido que entre mayor es el tiempo de exposición, su espesor incrementa.



## **5. CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

- Se realizó el diseño de un dispositivo que cumple con los requerimientos adecuados, para llevar a cabo pruebas de oxidación cíclica en el laboratorio de metalografía.
- Se construyó el mecanismo con una buena selección de materiales, tomando en cuenta los factores de seguridad que se requieren.
- Se puso a punto el mecanismo mediante una prueba experimental que permitiera conocer el comportamiento de este durante un ensayo de oxidación cíclica.
- Se analizó estadísticamente los resultados obtenidos y se estableció el comportamiento a temperaturas elevadas y con tiempos de exposición distintos.
- En los resultados se obtuvo un comportamiento para-lineal en el crecimiento de la capa de óxido, el crecimiento se observa de manera significativa a partir de los 50 ciclos.

### **5.2. RECOMENDACIONES**

- Para la utilización del mecanismo construido, se recomienda leer el manual de uso antes de realizar las pruebas.
- Se sugiere realizar el mantenimiento al equipo, recomendado en el manual de uso, al finalizar un ensayo.
- Para las pruebas de oxidación cíclica se recomienda verificar el sistema diariamente, llevar un sistema de control.
- Sacar las probetas de forma organizada y retirar las probetas que estén más alejadas de la base del horno.
- Recubrir la canastilla nuevamente con cemento refractario cada vez que se inicie un ensayo.

- Mantener los niveles de lubricante en la unidad de mantenimiento y compresor para un mejor funcionamiento del equipo.

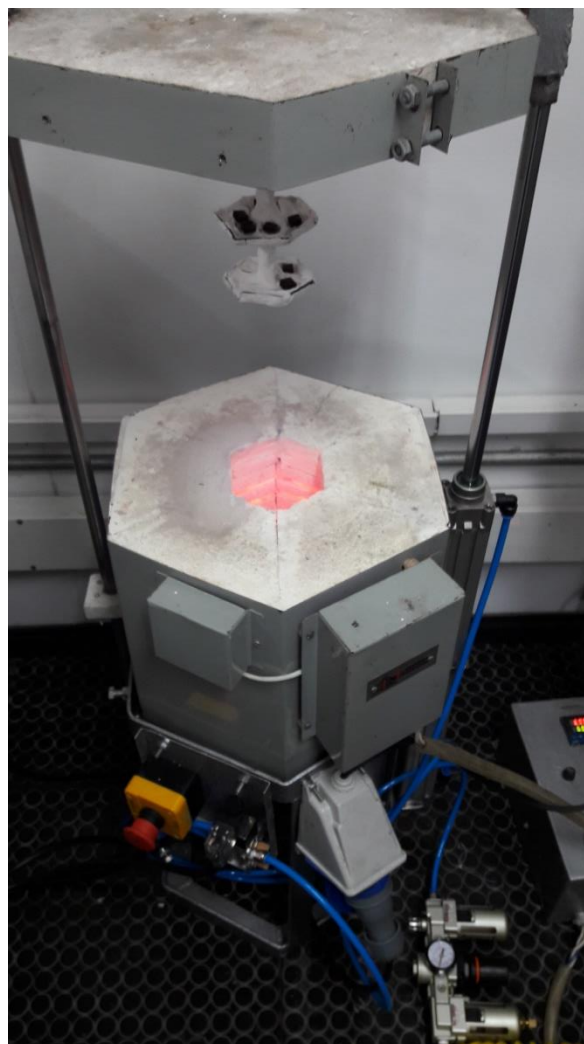
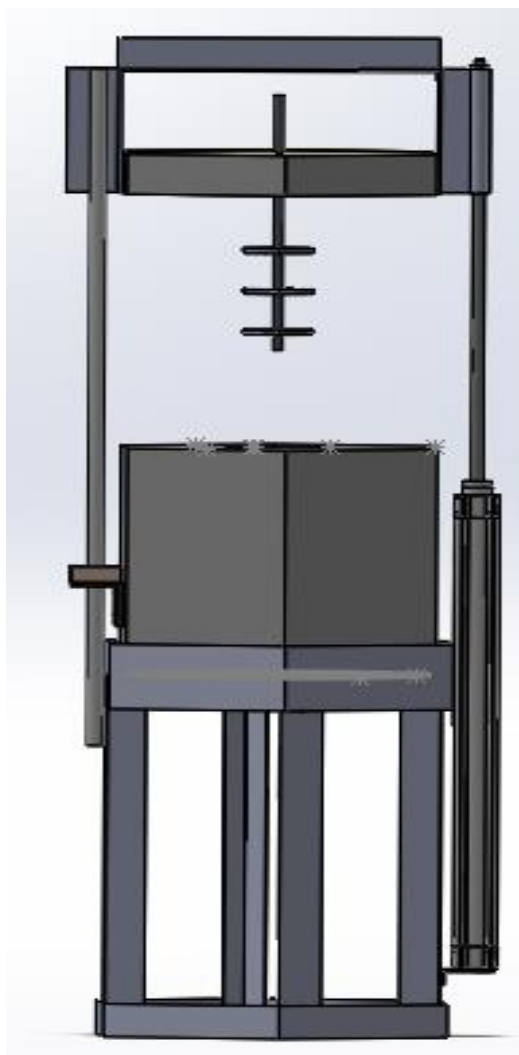
## **6. BIBLIOGRAFÍA**

- (1) MARTINEZ Villafañe, CHACON Nava, GAONA Tiburcio, ALMERAYA Calderón, Gonzales Rodríguez, Oxidación a altas temperaturas, p.3.
- (2) Al, George, High TEMPERATURE corrosion of engineering alloys: oxidation Ohio: ASM, 1990.p.15-43.
- (3) Primer Encuentro Nacional de corrosión y Protección. Universidad Antioquia (CESET grupo de corrosión), UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARARIANA (centro de investigación para el desarrollo integral), corrosión en sistemas en generación de vapor, Medellín 1991.p 1-6.
- (4) LIZCANO José Martín, ZABALA Eduardo. Evaluación de integridad y vida residual de caldera industriales.
- (5) SERNA José Aníbal, MERCHÁN, Rafael, AFANADOR Wilson, Aceros ferríticos.
- (6) GÓMEZ BARROSO, Carlos .Oxidación-carburación simultanea del acero ferríticos 9Cr-1Mo modificado grado p91, en ambientes con hidrocarburos a temperatura alta. Bucaramanga, 2002, p11-12, Trabajo de grado (M. Sc. Ingeniería Metalúrgica).
- (7) BUDYNAS, Richard G. NISBETT, J. Keith. Traducido por Jesús Murrieta y Efrén Alatorre. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. 8 ed. México: McGraw-Hill, 2008. 1060p. ISBN-10 970-10-6404-6.
- (8) BRADFORD, Samuel, A, Fundamentals of Corrosion in gases. 9 ed. Ohio ASM, 1987, p.
- (9) CARBOLITE, Operating & Maintenance instruction, Imperial College of Science and Technology, London, serial 12/98/2826, 1998.
- (10) ASM Handbook. Properties and selection irons steels and high-performance alloys.1997.vol 1.
- (11) MACHUCA MARTINEZ, Jesús y BARRAZA RESTREPO, Harold. Oxidación isotérmica del acero a altas temperaturas. Bucaramanga, 2002, p.22 Trabajo de grado.
- (12) Test method for continuous oxidation test elevated temperatures for metallic materials. Tokyo: JIS, 1993.
- (13) CARVAJAL Niño Yesid, Estudio cinético de la oxidación a alta temperatura del acero ferrítico.

- (14) Diseño Industrial. Pere Ponsa, Toni Granollers. Diseño y automatización industrial
- (15) Cardenas, Eivin Amaury Alvarez Cortes - Danaies de Jesus Infanzón. *Oxidación Isotérmica y Cíclica del Acero ASTM A 335 P 92 a Alta Temperatura*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga : s.n., 2009. Trabajo de Grado.

## 7. ANEXOS

### ANEXO 1. MANUAL DE USO MECANISMO PARA PRUEBAS DE OXIDACIÓN CÍCLICA



#### **PRECAUCIÓN**





Antes de usar el mecanismo, lea este manual y siga sus reglas e instrucciones de seguridad.

## CONTENIDO

<b>Instrucciones de seguridad .....</b>	<b>3</b>
<b>Instrucciones y pautas de seguridad importantes.....</b>	<b>3</b>
<b>Instrucciones y pautas de seguridad importantes.....</b>	<b>4</b>
<b>Ciclo de trabajo del compresor .....</b>	<b>5</b>
<b>Procedimiento de operación compresor.....</b>	<b>6</b>
<b>Mantenimiento.....</b>	<b>7</b>
<b>Programa para mantenimiento.....</b>	<b>8</b>
<b>Procedimiento de operación sistema electro-neumático .....</b>	<b>8</b>
<b>Pasos de operación sistema electro-neumático.....</b>	<b>9</b>
<b>Pasos de operación sistema electro-neumático.....</b>	<b>10</b>
<b>Pasos de operación sistema electro-neumático .....</b>	<b>11</b>
<b>Mantenimiento sistema electro-neumático.....</b>	<b>12</b>
<b>Programa para mantenimiento sistema electro-neumático.....</b>	<b>13</b>
<b>Procedimiento de operación horno.....</b>	<b>13</b>
<b>Pasos de operación horno.....</b>	<b>14</b>
<b>Mantenimiento.....</b>	<b>15</b>

## INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

El operador debe leer y entender la información siguiente. Esta información se ofrece para proteger al usuario durante la operación del mecanismo. Los símbolos siguientes son los que se utilizan para indicar al lector información que es importante para su seguridad.





 <b>PELIGRO</b> Indica una situación de riesgo inminente que de no evitarse, provocaría lesiones graves.	<b>PRECAUCIÓN</b>  Indica una situación potencialmente peligrosa que, de no evitarse, podría provocar lesiones menores o moderadas.
<b>ADVERTENCIA</b>  Indica una situación potencialmente peligrosa que, de no evitarse, podría provocar lesiones graves o la muerte.	<b>PRECAUCIÓN</b>  Al parecer sin el símbolo de alerta de seguridad, indica una situación potencialmente peligrosa que, de no evitarse, podría causar daños materiales

### Instrucciones y pautas de seguridad importantes

- Guarde todas las instrucciones

#### **ADVERTENCIA**

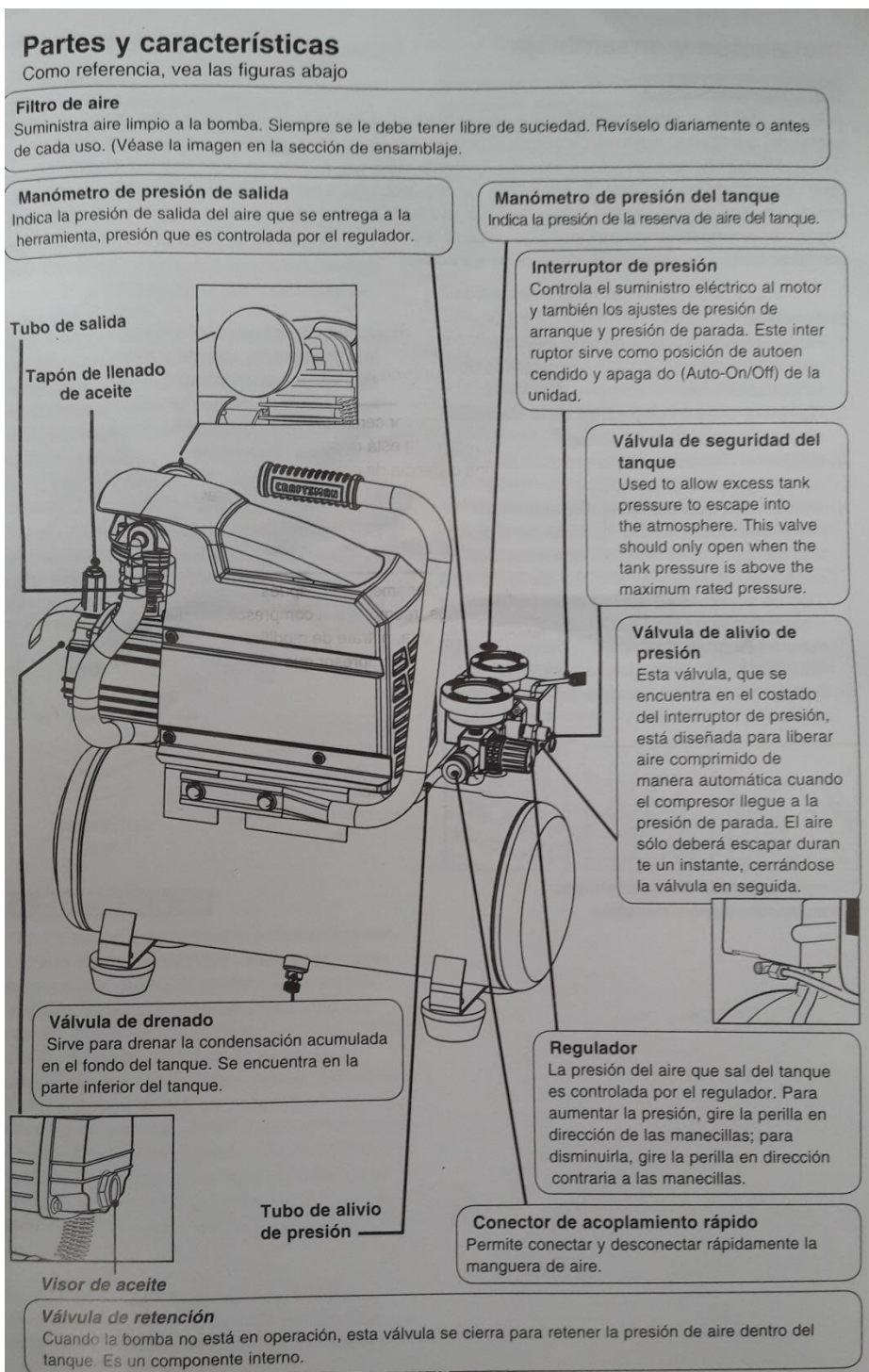
La operación y el mantenimiento inadecuados de este producto pueden provocar lesiones graves y daños materiales. Antes de utilizar este equipo, lea y entienda las advertencias e instrucciones de seguridad aquí contenidas.

<p>PRECAUCIÓN EN SU ALIMENTACION</p>	<p>El compresor de aire se debe operar desde un circuito de 15 amperes, se debe usar un circuito de mayor capacidad. Si es necesario, antes de emplear una extensión eléctrica, añada una manguera de aire más larga. Las extensiones eléctricas deben ser de calibre 12 y tener una longitud máxima de 7,6 metros. El fusible del circuito debe ser de acción retardada. Un voltaje demasiado bajo puede dañar el motor</p>
<p>RIESGO POR PARTES EN MOVIMIENTO</p> 	<p>Antes de operar el compresor, todos los protectores y cubiertas deben ser instalados correctamente. Cuando el mecanismo actúe no ponga las manos en el sitio donde va la tapa, ni toque el cilindro neumático en su recorrido pueden causar lesiones.</p>
<p>RIESGO DE QUEMADURAS</p> 	<p>En el compresor hay superficies que, de ser tocadas durante y después de su operación pueden causar quemaduras graves, antes de darle mantenimiento al equipo, se le debe dejar enfriar</p>
<p>RIESGO DE CAIDA</p> 	<p>El compresor tanto como el horno y su estructura se deben operar en una posición estable. Nunca utilice sobre un techo o una posición elevada desde donde podría caerse o volcarse. Al trabajar en posiciones elevadas utilice extensiones y mangueras de aire más largas.</p>
<p>RIESGO DE DESCARGAS ELECTRICAS</p> 	<p>Nunca utilice el compresor y el mecanismo bajo lluvia, verifique que la unidad del sistema eléctrico permanezca seca y apartada del compresor ya que este al operar puede presentar sustancias liquidas. Los problemas eléctricos deben ser reparados por personal autorizados, tal como lo sería un electricista.</p>



## CICLO DE TRABAJO

Este mecanismo tiene un ciclo de trabajo de 90%. Nunca opere el mecanismo en forma de juego es decir a cada segundo, de hacerlo podría dañarlo.



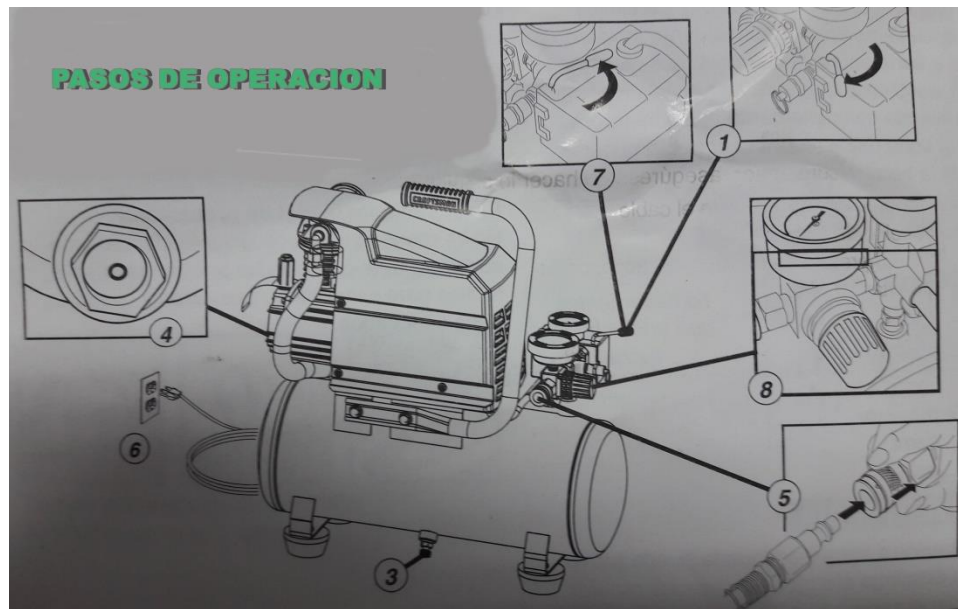
## **ADVERTENCIA**

Antes de realizar cualquier instalación al mecanismo, se debe apagar el compresor de aire, y desconectar el generador, además, se debe tener cuidado con las partes móviles. La fuente eléctrica, el aire comprimido y las superficies calientes que puedan provocar lesiones. El ensamble del mecanismo debe ser en forma complementaria a la parte neumática y eléctrica, un ensamble inadecuado puede ser causa de fugas y posiblemente de lesiones. Si no está seguro de entender las instrucciones o tiene dificultad para llevar a cabo el proceso revise el texto guía "CONSTRUCCION DE UN MECANISMO PARA PRUEBAS DE OXIDACION CICLICA".

## **PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN COMPRESOR**

### **Procedimiento diario de arranque.**

1. Ponga el interruptor Auto-On/Off en la posición de apagado (Off).
2. Verifique que el compresor del aire, la manguera de aire y todos los accesorios herramientas utilizados, no tengan daños ni obstrucción. Si algunas de las piezas descritas requieren reparación / reemplazo, cámbielas.
3. Cierre la válvula de drenaje.
4. Revise el nivel de aceite de la bomba.
5. Enchufe la manguera del aire dentro del conector de acoplamiento rápido. El collarín del conector de acoplamiento rápido saltará hacia adelante sujetando la clavija y hará una junta entre el conector y la clavija. Para desconectar la manguera del aire, empuje hacia atrás el collarín del conector de acoplamiento rápido.
6. Enchufe el cable de corriente en un tomacorriente apropiado.
7. Mueva el interruptor Auto-On/Off a la posición de encendido (Auto-On); el compresor deberá arrancar, acumulando la presión del aire en el tanque hasta llegar a la presión de apagado, momento en el cual se apagará de manera automática.
8. Ajuste el regulador a la presión de aire recomendada (PSI) para su aplicación cerciorándose de que esté dentro de las normas de seguridad para llevar a cabo la tarea. Para las herramientas neumáticas, el manual del fabricante debe tener recomendaciones sobre su presión de operación (PSI).
9. Ahora el compresor del aire está listo para ser usado.



#### **Procedimiento diario de apagado.**

- ⚠ Ponga el interruptor en la posición de apagado (Off).
- ⚠ Desconecte el cable del tomacorriente.
- ⚠ Ponga en cero el regulador de presión de salida.
- ⚠ Desconecte las herramientas y los accesorios. Siempre use protección para los oídos y los ojos al drenar el tanque. Drene el tanque en un lugar adecuado; en casi todos los casos habrá presencia de condensación en el drenaje.
- ⚠ Abra la válvula de drenaje permitiendo que escape el aire del tanque. Cuando haya salido del tanque todo el aire, cierre la válvula de drenaje para evitar que entre suciedad.

#### **MANTENIMIENTO**

##### **⚠ ADVERTENCIA**

Antes de dar mantenimiento al equipo, se debe apagar y desconectar del tomacorriente, así como purgar el aire del tanque y permitir que la unidad se enfríe.

##### **⚠ PRECAUCIÓN**

A fin de asegurar una operación eficiente y una larga vida del compresor, debe seguir un programa de mantenimiento de rutina. El siguiente programa de mantenimiento está enfocado al consumidor cuyo compresor es usado en un medio ambiente normal y diariamente.

## PROGRAMA PARA MANTENIMIENTO

Asuntos para verificar /cambiar	Antes de cada uso o diariamente
Revisar la válvula de seguridad del tanque	X
Revisar visualmente el aspecto general de la unidad	X
Revisar el filtro de aire	X
Drenar el tanque	X
Verificar que el cable eléctrico no este dañado	X
Cambiar el aceite	Después de las primeras 10 horas
	Después de cada 50 horas
Verificar el nivel de aceite	X

## ALMACENAMIENTO

Para almacenar el compresor, asegúrese de hacer lo siguiente:

1. Apague la unidad y desconecte el cable eléctrico del tomacorriente.
2. Quite del compresor las mangueras, accesorios y herramientas de aire.
3. Lleve a cabo el programa de mantenimiento de rutina.
4. Abra la válvula de drenaje para drenar el aire del tanque.
5. Cierre la válvula de drenaje.
6. Guarde el compresor en un lugar limpio y seco.

## PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN SISTEMA DE ELECTRONEUMATICA

### Procedimiento diario de arranque.

**NOTA: Nunca accione el sistema sin que este no este con aire, es decir el compresor debe estar conectado y funcionando para que el sistema eléctrico no tenga problemas, esto alargara la vida útil de la válvula electro-neumática.**

1. Verifique que el compresor esté listo para ser usado y conecte la manguera amarilla en la salida del compresor.
2. Una vez el compresor conectado se enchufe la manguera a la unidad de mantenimiento ya que esta va a brindar la alimentación del sistema.
3. Regule la presión de trabajo la cual la puede hacer de dos formas en el compresor y en la unidad de mantenimiento la que se recomienda para el ciclo de trabajo en la unidad de mantenimiento es de 20 psi a 40 psi y en el compresor de 40 a 90 psi.

4. Verifique que el compresor del aire, la manguera de aire y todos los accesorios herramientas utilizados, no tengan daños ni obstrucción. Si algunas de las piezas descritas requieren reparación / reemplazo, cámbielas.
5. Enchufe el cable de corriente en un tomacorriente apropiado para el sistema de electro-neumática a 110 V.
6. Gire el selector de posición a encendido
7. Programe el contador con el número de ciclos deseado con los botones que se muestran como lo es el reset y las flechas.
8. Programe el temporizador con el tiempo necesario para cada ciclo cada perilla del temporizador tiene un límite de operación de 60 minutos, asegúrese de mover bien las perillas con el tiempo requerido.
9. Pulse el botón verde para encendido.
10. La canastilla sale por el tiempo determinado por el usuario, ubique las probetas para el ciclo de trabajo y espere a que el sistema inicie por sí solo.

#### **⚠ ADVERTENCIA**

En caso de presentar algún problema durante la retracción del cilindro, presione el botón rojo (paro de emergencia), este lo que hará es subir la canastilla a su posición inicial y dará una señal al contador para que los ciclos no continúen.

#### **⚠ PRECAUCIÓN**

Después de apretar el botón de paro de emergencia verifique que este sea desenchufado, solo así el ciclo continuará de forma normal de lo contrario este no continuará en su ciclo de trabajo.

#### **⚠ PRECAUCIÓN**

Al quitar el paro de emergencia vuelva a pulsar el botón verde para dar continuidad al ciclo.

### **PASOS DE OPERACIÓN**

1.



2.





3.



4.



5.



6.



7.



8.



9.



10.



### Procedimiento diario de apagado.

**NOTA:** Luego de terminado el número de ciclos requeridos por el usuario retire las probetas de la canastilla limpie cualquier escombros y siga los siguientes pasos.

- ⚠ Ponga el selector de posición en apagado (Off).
- ⚠ Desconecte el cable del tomacorriente.
- ⚠ Ponga en cero el regulador de presión de salida del compresor como de la unidad de mantenimiento.
- ⚠ Desconecte las herramientas y los accesorios. Abra la válvula de drenaje permitiendo que escape el aire del tanque. Cuando haya salido del tanque todo el aire, cierre la válvula de drenaje para evitar que entre suciedad.
- ⚠ Apague del selector de posición el horno.
- ⚠ Desconecte el horno.
- ⚠ Organice cables para evitar lesiones.

### MANTENIMIENTO

#### ⚠ ADVERTENCIA

Antes de dar mantenimiento al equipo, se debe apagar y desconectar del tomacorriente, así como permitir que la unidad se enfríe después de cada ciclo de trabajo.

#### ⚠ PRECAUCIÓN

A fin de asegurar una operación eficiente y una larga vida del mecanismo y sus accesorios, debe seguir un programa de mantenimiento de rutina. El siguiente programa de mantenimiento está enfocado al usuario cuyo mecanismo es usado en un medio ambiente normal y diariamente.

### PROGRAMA PARA MANTENIMIENTO

Asuntos para verificar /cambiar	Antes de cada uso o diariamente
Revisar si el paro de emergencia no está puesto.	X
Revisar los silenciadores de la válvula	X
Revisar visualmente el aspecto general de la unidad eléctrica y el contador.	X
Revisar la canastilla y probetas que estén en su lugar	X
Revisar la salida y entrada del mecanismo con sus reguladoras de presión.	X



Verificar que el cable eléctrico no este dañado	X
Lubricar con aceite el pistón del cilindro neumático y la varilla de soporte.	Después de los primeros 100 ciclos
	Después de cada 100 ciclos.
Verificar el que la válvula siempre esté funcionando con aire y no solo con electricidad.	X

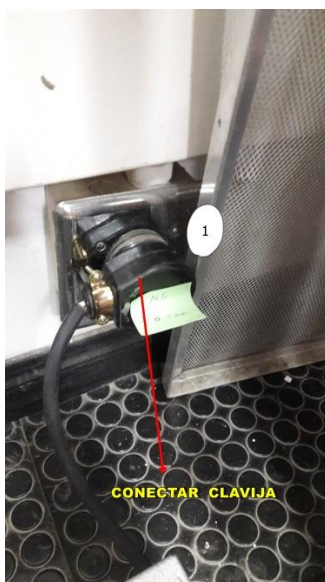
## HORNO

### Procedimiento diario de arranque.

1. Conecte la clavija a un tomacorriente apropiado verifique que sea a 220 V que es la corriente que necesita para encender el horno.
2. Mueva el selector de posición para encender.
3. Programe el contador de temperatura en la cual desee trabajar. Los botones y sus especificaciones de cada uno se muestran más adelante.
4. El contador de temperatura siempre va a demorar en estabilizar la temperatura que quiere.
5. El horno debe funcionar después de prendido el sistema de electro-neumática que tiene la tapa.

### PASOS DE OPERACIÓN

1.



2.



3.



4.



### Procedimiento diario de apagado.

- ⚠ Ponga el interruptor en la posición de apagado (Off).
- ⚠ Desconecte el cable del tomacorriente.
- ⚠ Desconecte las herramientas y los accesorios. Siempre use protección para las manos para la clavija de 220 deje el equipo en un lugar adecuado.

### MANTENIMIENTO

#### ⚠ ADVERTENCIA

Antes de dar mantenimiento al equipo, se debe apagar y desconectar del tomacorriente del equipo.

#### ⚠ PRECAUCIÓN

A fin de asegurar una operación eficiente y una larga vida del horno, debe seguir un programa de mantenimiento de rutina para hornos que está vinculado a la Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de Ingeniería Mecánica.